KOSMOS

Experimenteerhandboek

KOSMOS electronic XN3000

Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

Eerste druk
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart/1993

Technisch ontwerp: Kosmos Entwicklungslabor
Met medewerking van Günther Ramm, Braunschweig
Tekeningen: Friedrich Werth, Horb
Foto's: Atelier Weishaupt, Stuttgart
Printed in Germany/Imprimé en Allemagne

Algemene instructies en tips voor ouders en gebruikers:

Let op! Aan sommige onderdelen in deze doos zitten puntige of scherpe hoeken en randen. Deze kunnen **verwondingen** veroorzaken!

Om te experimenteren hebt u één, voor sommige proeven twee batterijen van 9 volt nodig van het **type 6 F 22**. Omdat deze batterijen slechts beperkte tijd houdbaar zijn, zijn ze niet aan de inhoud van het onderdelenpakket toegevoegd.

Gebruik uitsluitend batterijen van hetzelfde type en met dezelfde ladingsconditie.

Schakel batterijen niet parallel!

Gebruik geen oplaadbare accu's (NiCd), omdat deze bij kortsluiting kunnen **ontploffen!**

Batterijen nooit opladen! Dit kan een **ontploffing** veroorzaken!

Gebruik nooit batterijen in combinatie met een nettransformator. Dit kan een **ontploffing** veroorzaken!

Gebruik voor de netvoeding uitsluitend de KOSMOS-nettransformator X, bestelnummer 617 813.

Controleer de nettransformator en de toevoerleidingen regelmatig op beschadigingen aan kabel, leiding en steker, en het paneel op scheurtjes enz.
Als u een of ander mankement ontdekt, gebruik de nettransformator dan niet en laat hem in een gespecialiseerde elektrozaak of door de afdeling reserve-onderdelen van KOSMOS repararen.

Ga niet experimenteren met de wandcontactdoos van het lichtnet! De netspanning (220 volt) van het lichtnet is **levensgevaarlijk!**

Attentie! Voor het thuis aanwezig hebben van een radio (al is het type nog zo eenvoudig) is een bewijs van aangifte nodig. Het aangifteformulier is verkrijgbaar op het postkantoor.

KOSMOS

Experimenteerhandboek

KOSMOS electronic XN 2500 en XN 3000

door Klaus Schlenzig

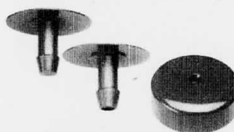
voor meer dan 300 proeven

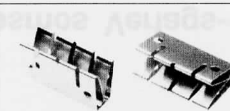
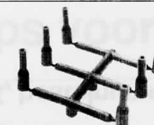
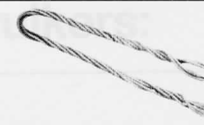
Om zonder risico's te experimenteren zijn twee batterijen van 9 volt nodig van het type 6F22. Deze batterijen zitten niet in het pakket omdat ze maar beperkt houdbaar zijn. In plaats van de batterijen kan gebruik worden gemaakt van de KOSMOS net-transformator X, bestelnummer 617813.

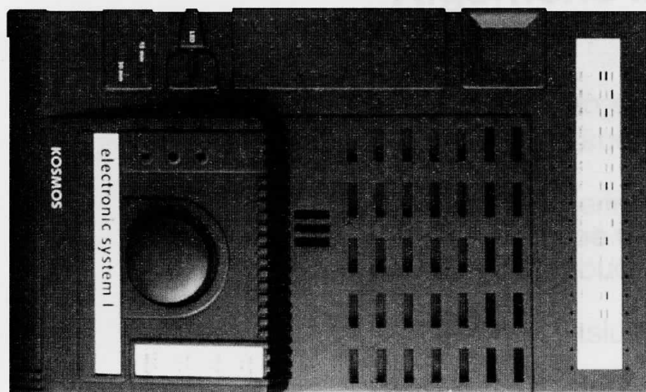
Franckh-Kosmos Verlags-GmbH & Co., Stuttgart

KOSMOS electronic pakket 1

Technische wijzigingen voorbehouden

Spuitstukje 1 2 doppen draaiknop voor instel-bare condensator **004 012**	

zakje met klemveren 33 stuks (multipack 6) **000 612**		batterij-aansluiting (multipack 6) **042 106**	
set contacthulzen 6 stuks **004 002**		3 stukken draad, gebundeld (multipack 6) **000 151**	

Bovenstuk van paneel 1 **070 207** en onderstuk **070407**	

electronic multipack 1 000 845

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool
weerstanden 10 stuks verschillende waarden		R R
condensatoren 6,8 nF 2 stuks		C C
elektrolytische condensatoren (elco's) 10 µF 100 µF		C + C
germaniumdiode		A DGe K / A D Ge K

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool
oortelefoon (multipack 4) **042 056**		EP EP
zakje 1 2 toetsen 3 schroeven (multipack 6) **000 148**		Ta Ta
licht-emitterende diode, superrood **000 145** licht-emitterende diode, groen **002 198** (multipack 4)		LED 1 A K LED 2 A K / A LED K
npn-transistor-module 2 stuks (multipack 4) **043 006**		B C E E / C B T E
instelbare condensator (multipack 4) **000 143**		A B C aansluitingen instelbare condensator in klemveren A, B en C / A C B
L-module (multipack 4) **000 144**		1 2 3 4 6 / 6 4 1 2 3
10 korte draadbruggen **000 282** 10 lange draadbruggen **000 292** (multipack 6)		

KOSMOS electronic pakket 2

Technische wijzigingen voorbehouden

Bovenstuk van paneel 2 **070 307** en onderstuk **070 407**	

Spuitstukje 2 draaiknop voor potmeter scharnierbout **004 022**		zakje met klemveren 33 stuks (multipack 7) **000 612**	
zakje 2 2 ogen 4 verbindingspennen 2 montageschroeven (multipack 7) **001 006**		3 stukken draad, gebundeld (multipack 7) **000 151**	

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool	
luidspreker (multipack 5) **001 003**		M N luidsprekeraansluitingen op klemveren M en N	SP
fototransistor (multipack 5) **002 159**		TF E C	C TF E
versterkermodule (multipack 5) **043 036**		AMP	V AMP A E
potentiometer P1, 10 kΩ (multipack 5) **001 004**		D E F potmeteraansluitingen op klemveren D, E en F	P
10 korte draadbruggen **000 282** 10 lange draadbruggen **000 292** (multipack 7)			

electronic multipack 2 001 009

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool	
weerstanden 5 stuks verschillende waarden		R	R
condensator 100 nF		C	C
elektrolytische condensatoren (elco's) 1 μF 10 μF		C	C

KOSMOS electronic pakket 3

Technische wijzigingen voorbehouden

2 zakjes met elk 33 klemveren **000 612**		set contacthulzen 6 stuks **004 002**	
Spuitstukje 3 2 doppen draaiknop voor potmeter **004 032**		lichtgolfgeleider (LGG) **000 676**	
batterij-aansluiting **042 106**		IC-sokkel-module **001 015**	
2x 3 stukken draad, gebundeld **000 151**		2x 10 korte draadbruggen **000 282** 2x 10 lange draadbruggen **000 292**	

electronic multipack 3 001 018

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool
weerstanden 15 stuks verschillende waarden		R R
condensator 100 nF		C C
elektrolytische condensatoren (elco's) 10 µF 2 stuks 100 µF 470 µF		C + C
siliciumdiode 2 stuks		A DSi K A D Si K

naam	onderdeel	opbouw- en schakelsymbool
meetinstrument **001 010**		K L aansluitingen meetinstrument op klemveren K en L + −
vochtigheidssensor **043 186**		HS
licht-emitterende diode, geel **001 013**		LED 3 A K; A LED K
infrarood-zenddiode **001 012**		A K IR-LED
pnp-transistor-module **043 066**		B C p n p E E; C B E T pnp
viervoudige operationele versterker IC 324 **001 016**		7 6 5 4 3 2 1 324 8 9 10 11 12 13 14; + − OP
zeventrapsteller IC 4024 **001 017**		7 6 5 4 3 2 1 4024 8 9 10 11 12 13 14; 4024
MOSFET-module **042 956**		G2 D MOSFET G1 S; D G2 G1 S
timermodule met IC 555 **001 014**		K1 K2 CTRL 555 OUT DIS R +; 555
potentiometer P2, 100 kΩ **001 011**		G H I potmeteraansluitingen op klemveren G, H en I; P

Alleen bestellingen van onderdelen op onze eigen bestelformulieren worden door ons in behandeling genomen. **(zie voor adres per land de bijgevoegde briefkaart).**

Schakel-symbolen

- kruising van leidingen zonder geleidende verbinding
- aftakking van leiding met geleidende verbinding
- kruising van leidingen met geleidende verbinding
- aansluitpunt
- toets (Ta)
- 9 volt-batterij (9V)
- weerstand (R)
- potentiometer (potmeter) (P)
- condensator (C)
- elektrolytische condensator (elco) (C)
- licht-emitterende diode (LED)
- diode (D)
- npn-transistor (T)
- pnp-transistor (T pnp)
- fototransistor (TF)
- N-kanaal-mosfet
- versterkermodule (AMP)
- hf-transformator met kern (spoel)
- instelbare condensator
- meetinstrument
- luidspreker (SP = speaker)
- oortelefoon (EP = earphone)
- operationele versterker (OP)
- hygro-sensor (HS = humidity sensor)
- 555 timermodule
- teller IC 4024
- antenne
- aarde
- massa

KOSMOS-Nettransformator X 617 813

Technische wijzigingen voorbehouden

In plaats van batterijen, die een bedreiging vormen voor het milieu, kan ook gebruik worden gemaakt van de KOSMOS nettransformator die wordt gevoed met stroom uit de wandcontactdoos. Deze levert een elektronisch gestabiliseerde spanning van 9 volt en is volledig en blijvend beveiligd tegen kortsluiting. **Let op! Als gebruik wordt gemaakt van de nettransformator X moeten beslist eerst de batterijen worden verwijderd. Gelijktijdig gebruik van batterijen en nettransformator kan een ontploffing veroorzaken! Houd u strikt aan de veiligheidsinstructies op de eerste binnenpagina van het omslag!**

617 813

617 912

KOSMOS-Netschakelapparaat X 617 912

Technische wijzigingen voorbehouden

Zelfs van een eenvoudige experimentele schakeling kun je een nuttig apparaat maken als je die uitbreidt met het KOSMOS netschakelapparaat X. Dit apparaat bestaat uit een relais (elektromagnetisch bediend schakelcontact) dat de laagspanningszijde (9 volt) volledig scheidt van de hoogspanningszijde (220 volt lichtnet). Aan de laagspanningszijde van het netschakelapparaat X zitten twee aansluitdraden, die worden verbonden met de elektronische schakeling (bijv. knipperlicht, dimmer enz.). Daarvoor worden meestal de licht emitterende diode en de voorschakelweerstand (470 Ω) uit de schakeling verwijderd en in plaats daarvan worden dan de beide aansluitdraden ingestoken. Aan de hoogspanningszijde wordt het netschakelapparaat X in een veiligheids-wandcontactdoos gestoken en is dan veilig op het lichtnet aangesloten. In het netschakelapparaat X zelf bevindt zich ook nog een veiligheidsstopcontact en hierop wordt het toestel aangesloten dat in- en uitgeschakeld moet worden (220 volt lampen, huishoudelijke apparaten, radio's enz.). Het schakelvermogen bedraagt 30 tot 1000 Watt.

220 V
KOSMOS Netschakel apparaat X
min. 30 Watt

Voorbeeld: knipperlichtschakeling volgens figuur 250

Inhoudsopgave

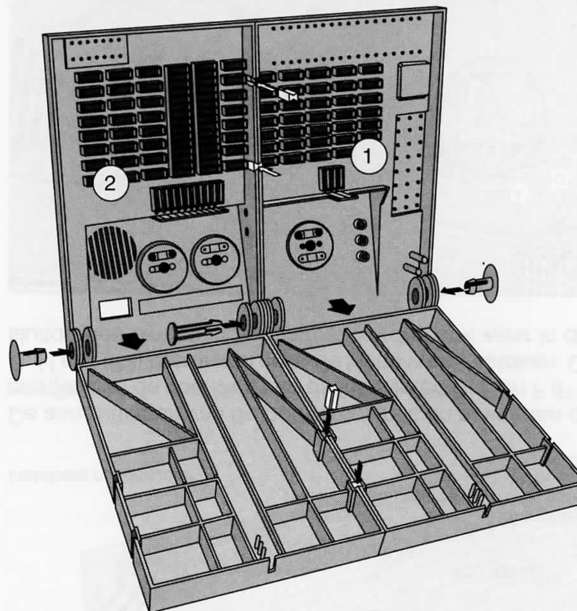
Het KOSMOS-electronic laboratorium XN 3000

Het electronic laboratorium XN 3000 bestaat uit drie materiaalsets, de zogenaamde electronic pakketten 1 t/m 3, en deze gebruiksaanwijzing van 170 bladzijden met meer dan 300 experimenten. Op bladzijde 2, 3 en 4 vind je een gedetailleerde lijst met de inhoud van elk pakket compleet met foto, artikelnummer, schakelsymbool en opbouwsymbool. De meeste onderdelen zijn in zogenaamde multipacks verpakt of opgestoken, zoals je ook kunt opmaken uit de materiaallijsten. Sommige onderdelen, te weten de spuitstukjes met knoppen, vind je binnen in de panelen.
Je doet er verstandig aan vooraan in het experimenteerboek te beginnen en het dan stap voor stap door te werken. Alleen op die manier leer je alle onderdelen van het laboratorium grondig kennen en kun je alle experimenten met succes uitvoeren.
Houd je vooral strikt aan de veiligheidsinstructies op de eerste binnenpagina van het omslag.
Wij wensen iedereen die aan het experimenteren gaat veel succes en plezier met het KOSMOS-electronic laboratorium XN 3000!

Gebruiksaanwijzing voor de montage van electronic XN 3000

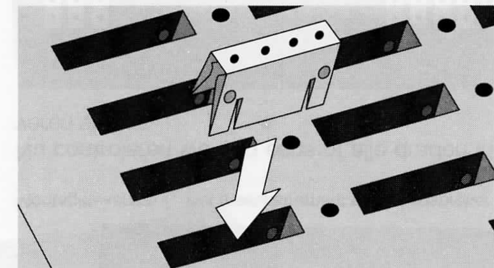
Het monteren van de panelen

Eerst gaan we de beide panelen in elkaar zetten zoals aangegeven op montagetekening 1. Daarvoor worden de onderstukken (070 407) met twee verbindingspennen uit zakje 2 (001 006 in multipack 7) aan elkaar vastgemaakt en de bovenstukken - paneel 1 (070 207) van achter gezien aan de rechter kant en paneel 2 (070 307) aan de linker kant - met de scharnieren in de onderstukken geschoven. Vervolgens wordt zowel van links als van rechts een dop van het spuitstukje 1 (004 012) in de scharnieren van het onderstuk en het bovenstuk gestoken. In het midden worden de twee paneelhelften verbonden door middel van de scharnierbout van spuitstukje 2 (004 022) die gewoon van links of rechts in de scharnieren wordt gestoken. Tenslotte worden de beide bovenste gedeelten met de twee overblijvende verbindingspennen aan elkaar vastgemaakt en vormen dan één geheel. Binnenin ons experimenteerpaneel hebben we nu genoeg plaats om onderdelen die we niet nodig hebben veilig op te bergen. De gaatjesroosters aan de linkerkant en de bovenkant van paneel 1 kunnen worden gebruikt als een veilige "parkeerplaats" voor weerstanden, condensatoren, modules enz. zolang je die niet nodig hebt.
Bij sommige experimenten worden de beide panelen los van elkaar gebruikt (bijv. bij proeven met afstandsbediening door middel van de infrarood-zenddiode en de fototransistor). In zo'n geval worden de verbindingspennen weer uit de onderste en bovenste gedeelten verwijderd en de scharnierbout in het midden weggehaald. In plaats daarvan worden dan de twee overblijvende doppen in het scharnier gestoken, één in elk paneel. Op die manier krijg je twee afzonderlijke volledig operationele experimenteerpanelen.

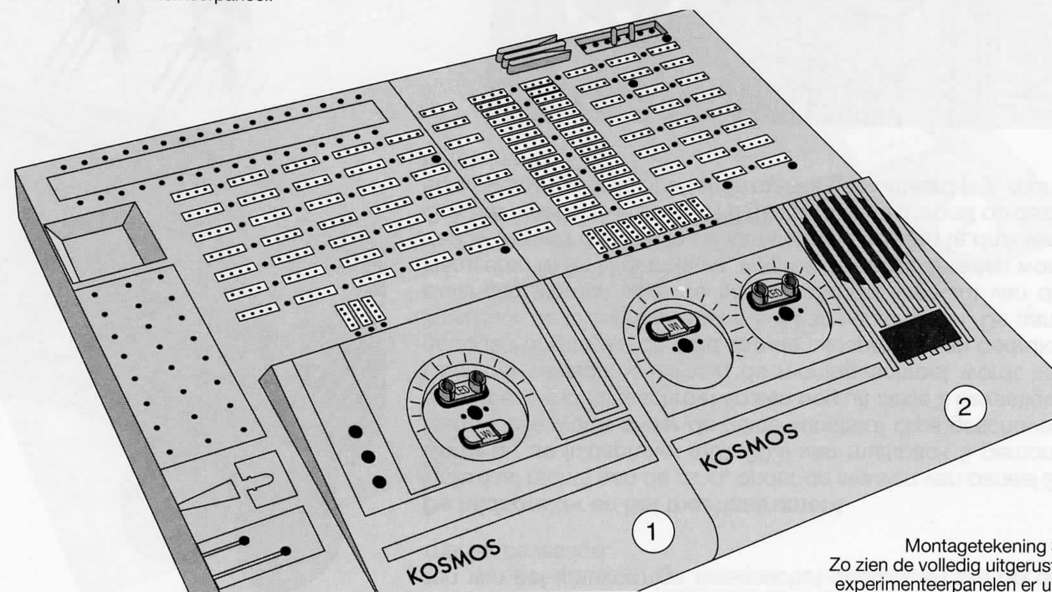


Montagetekening 1. Het monteren van het experimenteerpaneel.

De klemveren
De klemveren (000 612) van multipack 6, 7 en pakket 3 worden in de panelen gestoken, zoals aangegeven op montagetekening 2.


Montagetekening 2.
Steek de klemveren zover in de uitsparingen tot ze vastklikken.

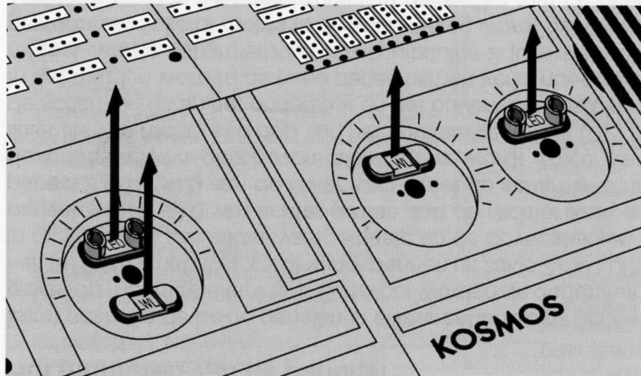
In deze klemveren moeten de onderdelen, modules en draadbruggen, worden gestoken; zij zorgen ervoor dat alle onderdelen stevig op hun plaats blijven en brengen de elektrische verbinding tussen de afzonderlijke delen tot stand.



Montagetekening 3.
Zo zien de volledig uitgeruste experimenteerpanelen er uit.

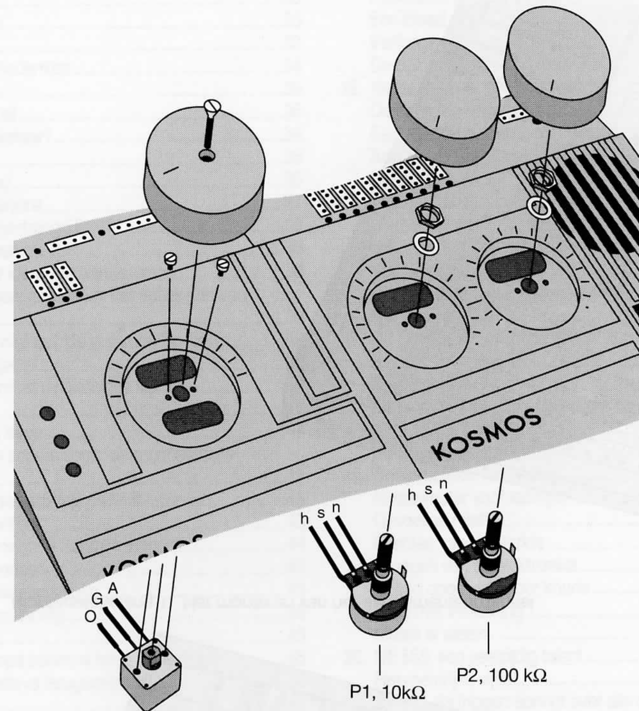
De instelbare condensator en de potentiometers

Voordat we de instelbare condensator en de potmeters monteren, moeten we de houders "LGG" en "LED" uit paneel 1 en 2 verwijderen en zorgvuldig opbergen omdat we ze later nodig hebben voor de opto-elektronische proeven.



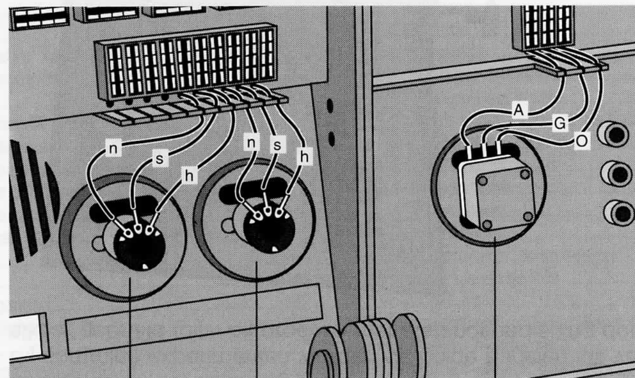
Montagetekening 4. Haal de kunststof onderdelen "LGG" en "LED" voorzichtig uit de panelen door ze te verdraaien. Knip de bramen af.

Nu gaan we de instelbare condensator (000 143) van multipack 4 in paneel 1 inbouwen, en de potentiometers (001 004 en 001 011) van multipack 5 en electronic pakket 3 in paneel 2. Daarbij moeten de aansluitingen van de instelbare condensator en de potentiometers in de richting van de klemveren wijzen zoals op montagetekening 5 is aangegeven.
De instelbare condensator wordt met de twee kleine cilinderkopschroefjes uit zakje 1 (000 148) van multipack 6 op paneel 1 bevestigd. De as van de instelbare condensator wordt helemaal naar links gedraaid, vervolgens wordt de knop van spuitstukje 1 met het gaatje in het midden daarop geplaatst, waarbij het markeringsstreepje naar links wijst, en met de lange schroef met verzonken kop uit zakje 1 vastgeschroefd.
De 10 kilo-ohm potentiometer P1 (001 004) bevestigen we met de opgeschroefde zeskantmoer op paneel 1 aan de linker kant. Dan wordt de as van de potmeter naar links gedraaid tot aan de aanslag en de knop van spuitstukje 2 (004 022) daar zodanig opgezet, dat het markeringsstreepje van de knop en het markeringspunt op de schaalverdeling op het paneel boven elkaar staan. Op dezelfde manier wordt ook potentiometer P2 gemonteerd.
De aansluitingen van de instelbare condensator O, G en A (herkenbaar aan de achterkant) worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren A, B en C van paneel 1 getrokken en in de klemveren gestoken. De aansluitdraden worden binnen in het paneel in de spleten van het kamvormige tussenschot gedrukt en op die manier bevestigd.



Montagetekening 5.
Het inbouwen van de instelbare condensator en de potmeters.

De aansluitingen van de potmeters (h, s en n) worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren D, E en F (P1) resp. G, H en I (P2) getrokken en in de klemveren gestoken. De aansluitdraden binnen in het paneel worden ook weer in de sple-

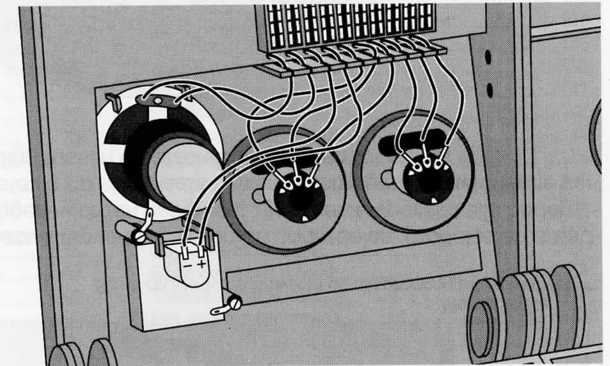


Montagetekening 6. Inbouw voltooid: potmeters en instelbare condensator.

ten van het kamvormige tussenschot gedrukt en zijn op die manier bevestigd.

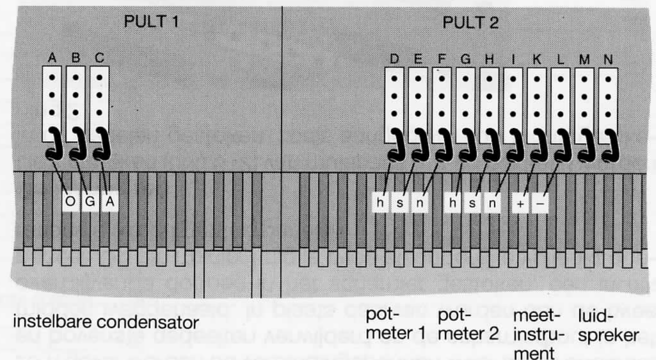
De luidspreker en het meetinstrument

Helemaal rechts aan de rand, onder de sleuven van paneel 2, wordt nu de luidspreker (001 003) van multipack 5 gemonteerd. Deze wordt onder de beide kunststof clips geschoven en met een montageschroef en een oog uit zakje 2 bevestigd. Door het vastschroeven van de montageschroef wordt het gebogen oog tegen de rand van de luidspreker aan gedrukt, waardoor de luidspreker niet meer kan verschuiven. De aansluitingen worden door de gaatjes aan de voorkant van de klemveren M en N getrokken, waarbij de aansluitdraden worden bevestigd door ze in de kamvormige spleten te drukken. Ook het meetinstrument (001 010) van pakket 3 wordt op deze eenvoudige maar doeltreffende manier gemonteerd (vgl. montagetekening 7).



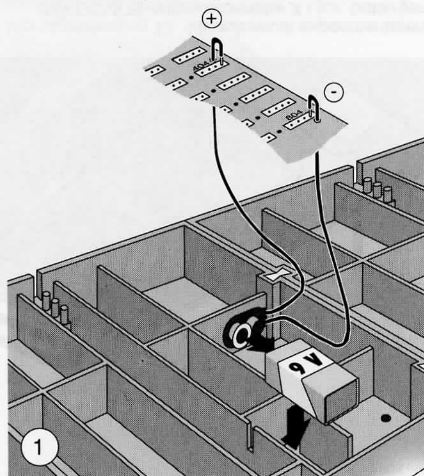
Montagetekening 7. Het meetinstrument en de luidspreker worden ingebouwd.

Nu controleren we nog eens of alle draden in de juiste klemveren steken.



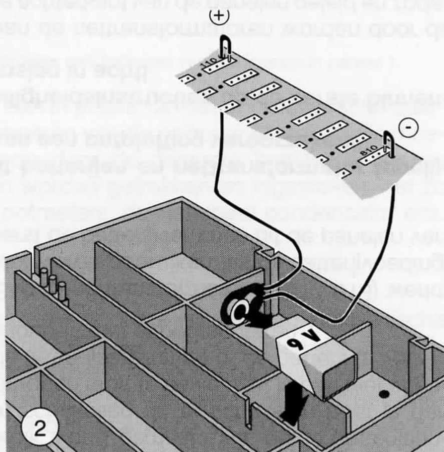
Montagetekening 8. Controleren kan geen kwaad!

De stroomvoorziening
Nu wordt het tijd om de batterij aan te sluiten. Daarvoor hoef je alleen maar de batterijklem (042 106) van multipack 6 in het daarvoor bestemd vak (paneel 1) te leggen en de aansluitingen ervan door de gaatjes bij klemveer 404 (rode plus-aansluiting) en 804 (zwarte of blauwe min-aansluiting) te trekken en vervolgens in deze klemveren te steken (montagetekening 9).



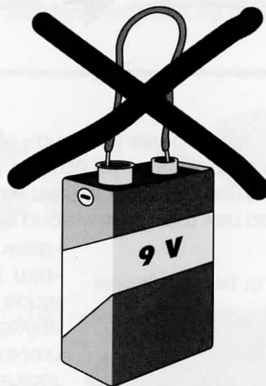
Montagetekening 9. Let vooral goed op de juiste polariteit: plus (rood) 404, min (zwart of blauw) 804.

Op dezelfde manier wordt de tweede batterijklem van pakket 3 (paneel 2) gemonteerd, waarbij in dit geval de plus-aansluiting in klemveer 110 en de min-aansluiting in klemveer 810 moet worden gestoken (montagetekening 10).



Montagetekening 10. Let ook hier weer goed op de juiste polariteit: plus (rood) 110, min (zwart of blauw) 810.

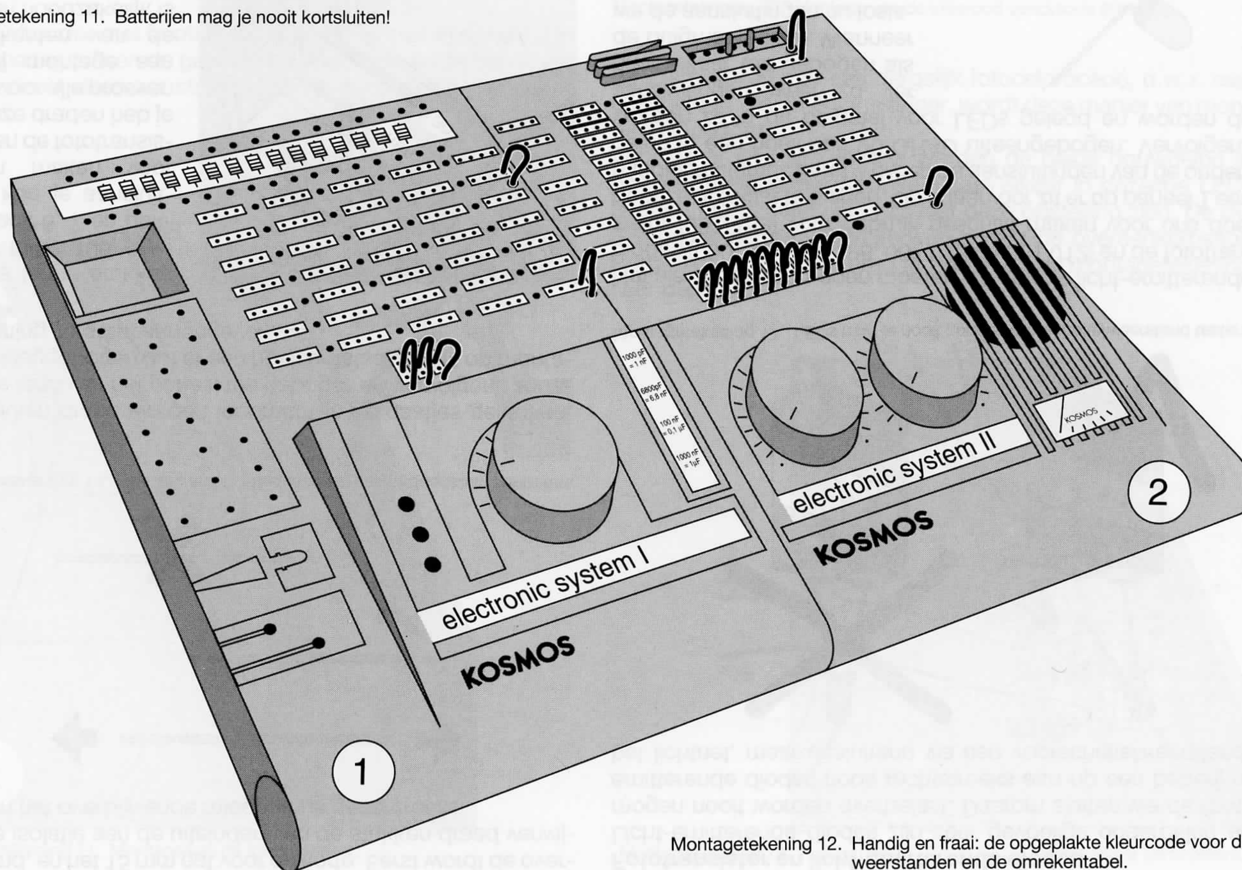
Haal geen gevaarlijke experimenten uit met batterijen! Het kortsluiten van batterijen kan een ontploffing veroorzaken!



Montagetekening 11. Batterijen mag je nooit kortsluiten!

Voor de meeste proeven, in het bijzonder tot we gaan werken met de operationele versterker 324 (001 016) van pakket 3, maken we alleen gebruik van de batterijaansluiting in paneel 2.

Uit de (in dit instructieboek) ingevoegde kleurenpagina knippen we nu met een schaar de strook met de weerstanden, de kaartjes met de opschriften "electronic system I" en "electronic system II" en de omrekentabel voor condensatoren en plakken deze met een beetje lijm op de daarvoor bestemde plaats op paneel 1 resp. paneel 2 (montagetekening 12).



Montagetekening 12. Handig en fraai: de opgeplakte kleurcode voor de weerstanden en de omrekentabel.

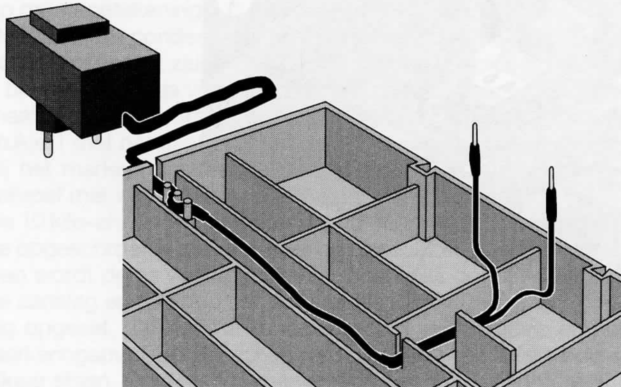
In bijna alle schakelingen wordt een draadbrug als hoofdschakelaar gebruikt. Deze wordt aangeduid met “S”, of “S1” en “S2” wanneer gebruik wordt gemaakt van beide batterijaansluitingen. Om een schakeling uit te schakelen hoef je dan alleen maar deze bruggen eruit te halen. Het is dan niet absoluut noodzakelijk de batterijaansluiting of de batterij te verwijderen als je wilt ophouden met experimenteren.

Als je met de KOSMOS-nettransformator X (617 813) werkt, moet je dezelfde klemveren gebruiken als bij batterijvoeding. Je moet dan wel eerst de batterijklemmen uit de panelen verwijderen.

Let op: sluit nooit batterijen en nettransformator tegelijkertijd aan!!! Dit kan een ontploffing veroorzaken!!!

Neem altijd de veiligheidsinstructies op de eerste binnenpagina van het omslag in acht!

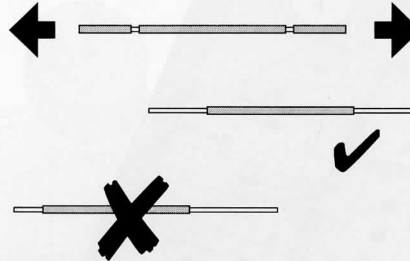
De aansluitingen van de nettransformatoren worden door de uitsparingen aan de achterkant van de panelen geleid en zodanig om de drie tappen gevlochten dat voor een zekere mate van bescherming tegen trekbelasting is gezorgd. De aansluitingen van de KOSMOS-nettransformator worden door dezelfde gaatjes getrokken als die waardoor de aansluitingen van de batterijklemmen geleid worden en in dezelfde klemveren gestoken (montagetekening 13).



Montagetekening 13. Milieubewust experimenteren: de KOSMOS-nettransformator X i.p.v. batterijen!

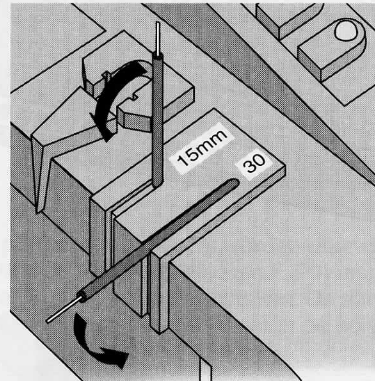
Draadbruggen en draden

De lange (000 292) en korte (000 282) stukken draad in de zakjes van multipack 6, 7 en pakket 3 worden tot draadbruggen gebogen. Daarvoor maken we gebruik van de buigvormen in paneel 1. Het 30 mm gat is voor de lange draadbruggen bestemd, en het 15 mm gat voor de korte. Eerst wordt de overbodige isolatie aan de uiteinden van de stukken draad verwijderd en het overblijvende middenstuk gecentreerd.



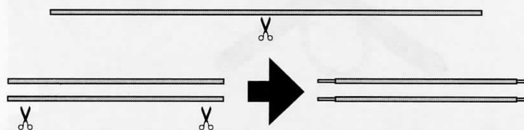
Montagetekening 14. Isolatieresten aftrekken en het middenstuk centreren.

De stukken draad worden loodrecht in de gaatjes gestoken, naar de rand van het paneel toe gebogen en vervolgens zodanig omlaaggebogen dat er een hoek ontstaat, zoals op montagetekening 15 staat aangegeven.



Montagetekening 15. Gemakkelijk te maken: draadbruggen.

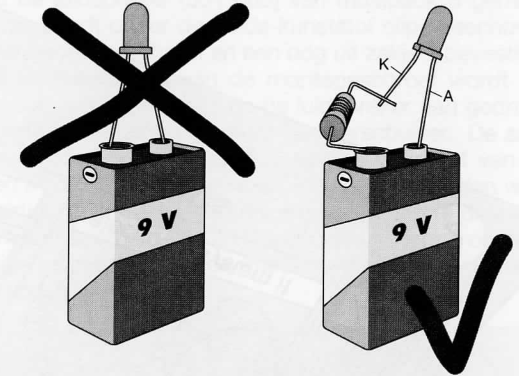
Van de lange stukken draad (042 106) van multipack 6, 7 en pakket 3 kun je aansluitdraden maken voor LEDs en de fototransistor. Deze draden heb je nodig voor alle proeven waarbij montage aan de zijkanten van de panelen noodzakelijk is (fotocel enz.). Daarvoor worden 5 stukken draad met een stevige schaar of een echte zijkniptang in het midden doorgeknipt, waarna aan elk uiteinde ongeveer 15 mm van de isolatie wordt verwijderd. Een op die manier geprepareerde, in tweeën gedeelde draad volstaat voor de fototransistor of één LED. In het volgende hoofdstukje komen zij aan de beurt.



Montagetekening 16. De aansluitingen voor LEDs en de fototransistor.

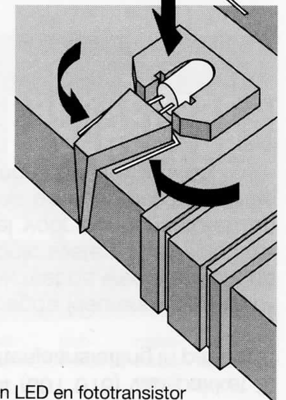
Fototransistor en licht-emitterende diodes

Licht-emitterende diodes zijn zeer gevoelige onderdelen en mogen nooit worden overbelast. Daarom sluiten we de licht-emitterende diodes nooit rechtstreeks aan op een batterij of het lichtnet, maar uitsluitend via een voorschakelweerstand!



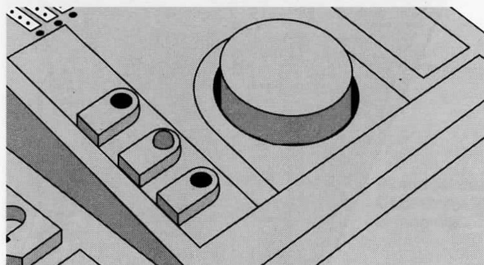
Montagetekening 17. LEDs mag je nooit zonder voorschakelweerstand testen!

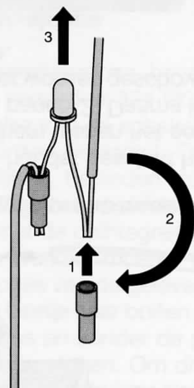
Net als de draadbruggen moeten we ook de licht-emitterende diodes (000 145, 002 198, 001 013 en 001 012) en de fototransistor (002 159) vóór gebruik geschikt maken voor ons doel door ze op maat te buigen. Ook daarvoor zit er op paneel 1 een handige buigmal. Eerst worden de aansluitingen van de onderdelen in een hoek van 90 GRAD uiteengebogen. Vervolgens worden ze in de buigmal voor LEDs gelegd en worden de aansluitingen weer zo ver naar elkaar toe gebogen als de buigmal toelaat. Wanneer we de aansluitingen nu loslaten, houden zij automatisch de juiste onderlinge afstand van 15 mm aan.



Montagetekening 18. Het op maat buigen van LED en fototransistor is met behulp van de buigmal doodeenvoudig.

Met de contacthulzen (004 002) kunnen we de LEDs en de fototransistor voorzien van draden. We maken eerst de contacthulzen los van het spuitstukje. Vervolgens steken we telkens één aansluiting van het onderdeel samen met het afgestripte uiteinde van een lange draad in een contacthuls en buigen deze in een scherpe hoek omlaag. Daarna kunnen we het onderdeel indien nodig in een van de drie openingen van paneel 1 steken (montagetekening 19).



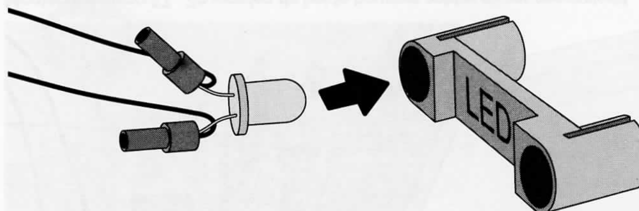


Montagetekening 19.
Opto-elektronische onderdelen met leidingen voor de inbouw in paneel 1.

De draden worden dan in plaats van het onderdeel in de daarvoor bestemde klemveren van de opbouw gestoken. Ze moeten dan van onderop door de daarvoor bestemde gaatjes naast de klemveren worden getrokken en ingestoken, net zo als we dat met de potmeters, de instelbare condensator enz. hebben gedaan.

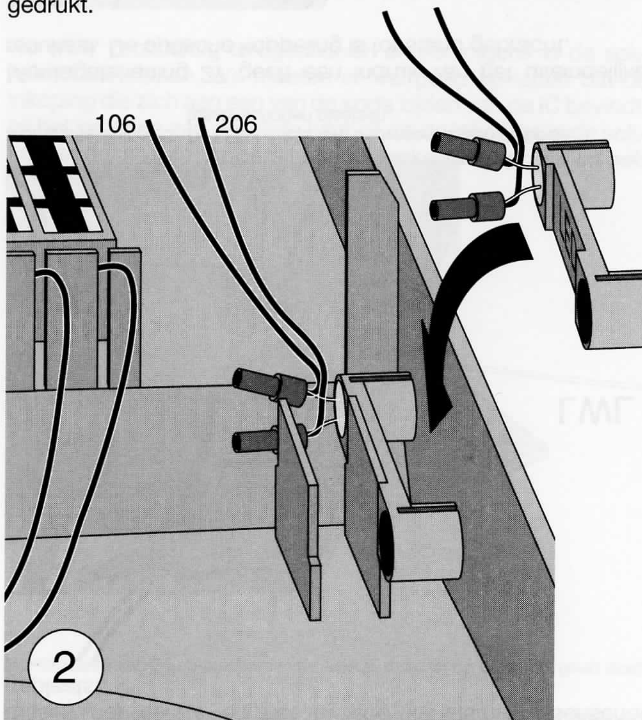
LED-houders

Bij alle proeven, waarvoor montage van de opto-elektronische onderdelen aan de zijkant is vereist, gebruiken we de LED-houders om deze onderdelen te bevestigen. We nemen een LED-houder, die we bij het begin van de montage van de panelen uit paneel 1 of 2 hebben verwijderd, en de van draden voorziene fototransistor (TF) in de hand en steken deze in de opening aan de kant waar geen spleet zit. De doorsnede aan de buitenkant is niet bij alle licht-emitterende diodes even groot; daarom is de opening net groot genoeg om ook de grootste licht-emitterende diodes nog te kunnen insteken. Licht-emitterende diodes met kleinere afmetingen moeten eventueel met een stukje papier worden vastgeklemd (montagetekening 20).



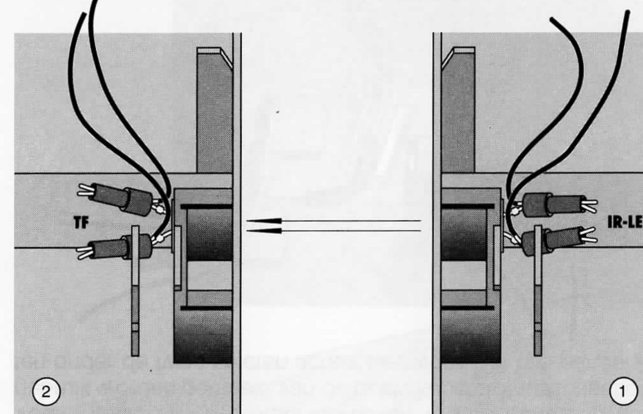
Montagetekening 20. De LED-houder wordt uitgerust met de fototransistor.

De LED-houder met fototransistor wordt binnen in paneel 2 in de uitsparing tussen de gaten in de zijkanten van de behuizing en het direct daarvoor staande eerste kunststof tussenschot gedrukt.



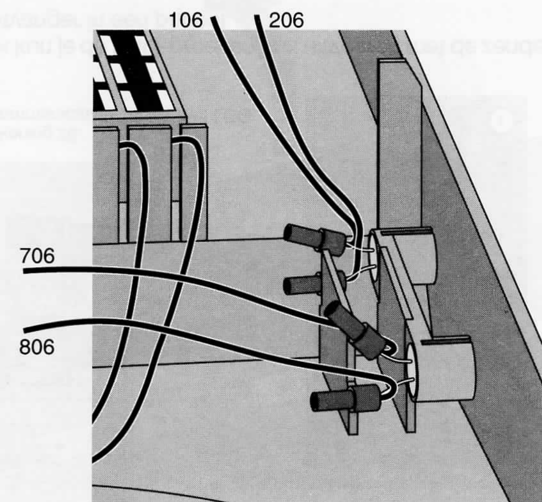
Montagetekening 21. Montage van de fototransistor.

Op dezelfde manier wordt de infrarood-zenddiode (IR-LED) in paneel 1 gemonteerd (montagetekening 22).



Montagetekening 22. Montage van de infrarood-zenddiode (IR-LED).

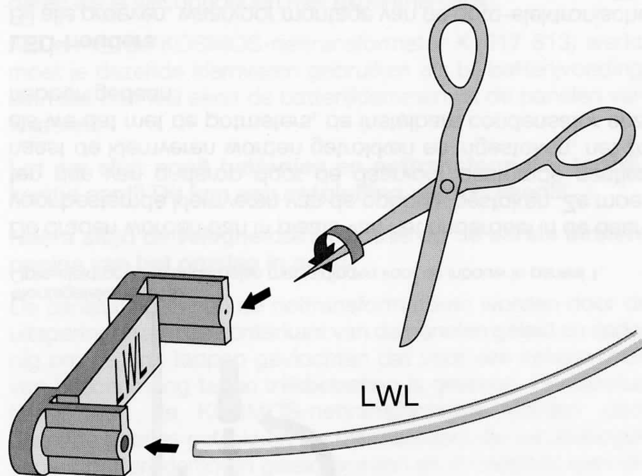
Bij alle proeven met een dergelijk fotocelprocédé, d.w.z. met gescheiden zender en ontvanger, wordt deze manier van monteren toegepast.
Voor de proef reflex-fotocel worden de beide bouwdelen in paneel 2 gemonteerd, en wel naast elkaar in dezelfde LED-houder. Montagetekening 23 laat deze opstelling zien. De cijfers op de aansluitingen verwijzen naar de overeenkomstige klemveren en zijn ook terug te vinden op de montagetekening voor deze proef.



Montagetekening 23. Fototransistor (TF) en IR-LED naast elkaar gemonteerd.

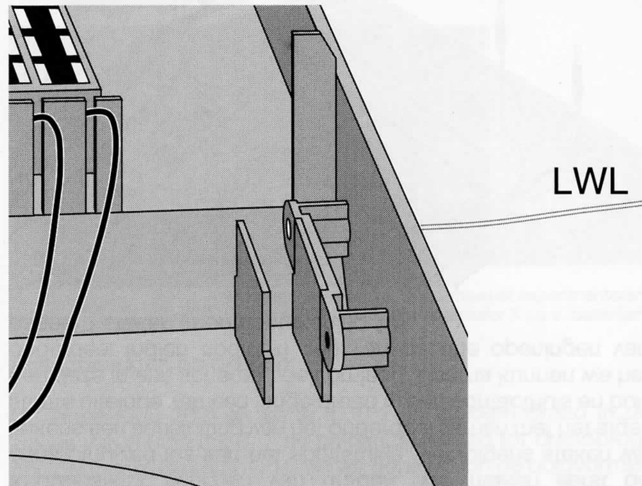
De LGG-houder

De lichtgolfgeleider LGG (000 676) wordt samen met de LGG-houder gebruikt. Eerst moeten we de kleine gaatjes van de LGG houder met een scherp voorwerp (pas op dat je je niet bezeert!) een beetje breder maken, zodat de LGG er wel in past maar er niet van zelf uit kan vallen.



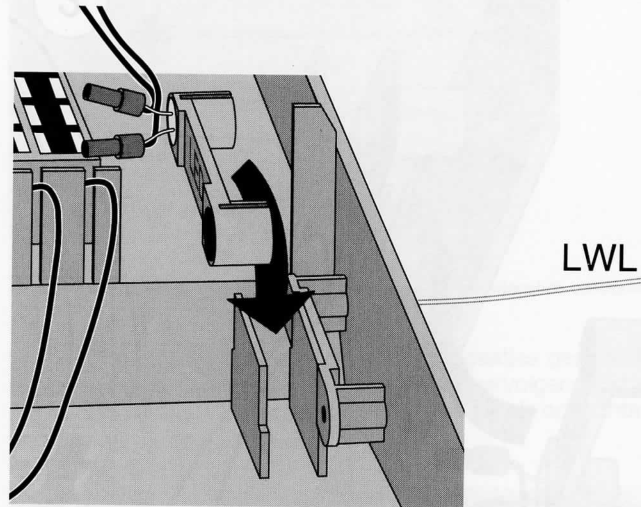
Montagetekening 24. De LGG-houder wordt aangepast.

Nadat we de houder geschikt hebben gemaakt voor de LGG, plaatsen we hem tussen het eerste kunststof tussenschot en de wand van paneel 2. Daarna kan de LGG van de buitenkant af in de houder worden geschoven. Hij mag aan de binnenkant niet uitsteken.



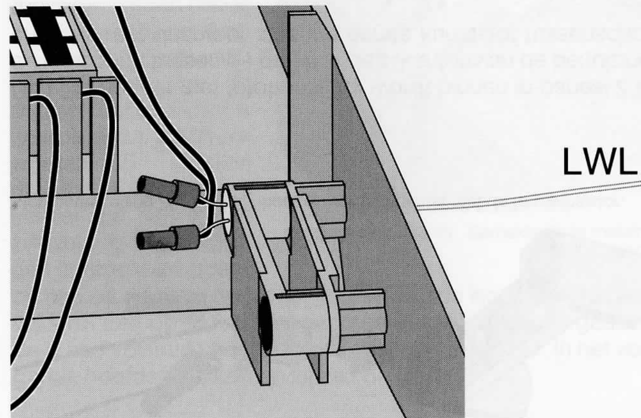
Montagetekening 25. De LGG wordt naar binnen geschoven.

Nu wordt de LED-houder met de fototransistor of de IR-LED tussen het eerste en het tweede kunststof tussenschot geplaatst.



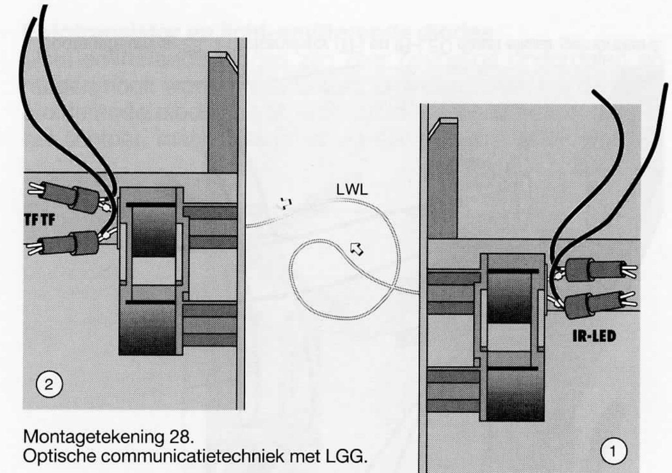
Montagetekening 26. De LED-houder met onderdeel tussen de beide tussenschotten plaatsen.

Montagetekening 27 geeft een indruk van het uiteindelijke resultaat. De optische koppeling is tot stand gebracht.



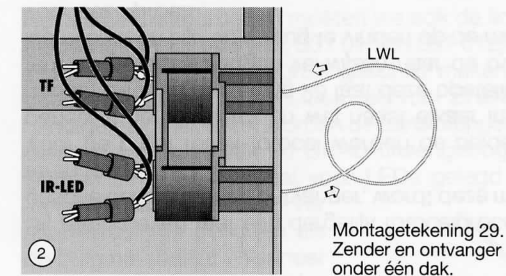
Montagetekening 27. Zo worden de beide houders achter elkaar geschakeld.

Op montagetekening 28 zien we een typische toepassingsmogelijkheid voor deze manier van monteren: aan de linkerkant bevindt zich in paneel 2 als ontvanger de fototransistor (TF), aan de rechterkant in paneel 1 als zender de IR-LED. Daartussen als overdrachtsmedium, ook in niet-rechte lijn, de LGG.



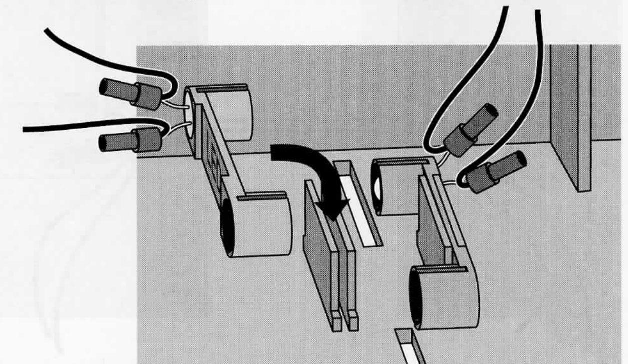
Montagetekening 28.
Optische communicatietechniek met LGG.

Natuurlijk kun je de LGG-proeven ook uitvoeren met de zender en de ontvanger in één paneel.



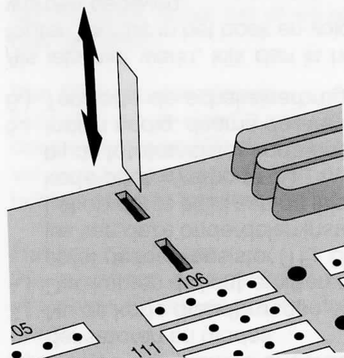
Montagetekening 29.
Zender en ontvanger onder één dak.

Voor fotocel- en overdrachtsproeven in één behuizing kan gebruik worden gemaakt van de beide kunststof tussenschotten onder de twee spleten achter klemveer 106 van paneel 2.



Montagetekening 30.
In het paneel is de storende werking van licht van buitenaf minder groot.

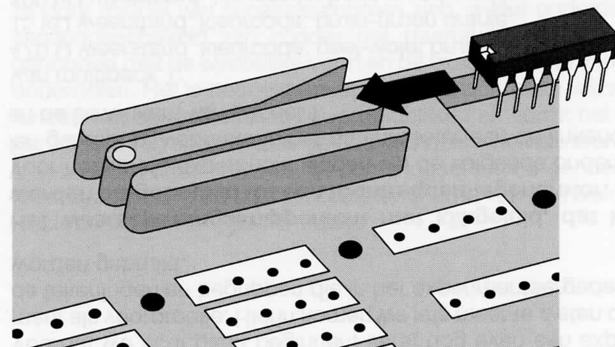
Door deze twee spleten kun je deze minifotocel onderbreken zonder dat je daarvoor het paneel hoeft te openen. Je schuift dan gewoon een stukje papier in de spleet.



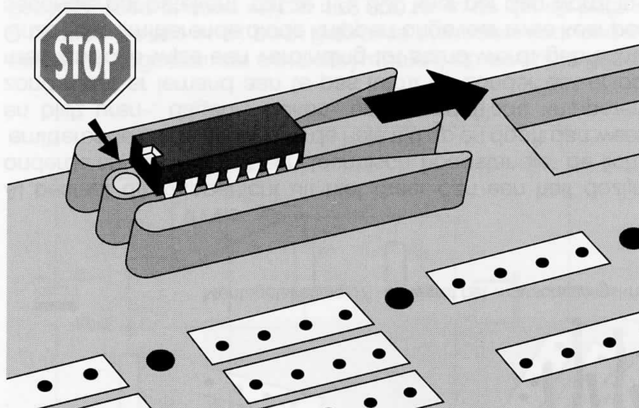
Montagetekening 31.
Onderbreking van buitenaf is mogelijk.

IC-former en -ejector

Deze experimenteerdoos bevat twee ICs, een viervoudige operationele versterker 324 (001 016) en een teller 4024 (001 017) die na elkaar in de schakelingen op de IC-sokkelmodule (001 015) worden geplaatst. Om montage en demontage te vergemakkelijken, bevinden zich rechts boven op paneel 2 twee heel nuttige hulpmiddelen, de former en de ejector. Voordat we met de geïntegreerde schakelingen, kortweg ICs, kunnen gaan werken, moeten we ze prepareren. Gewoonlijk wijzen de pootjes van de geleverde ICs niet loodrecht omlaag, maar zijn een beetje naar buiten gebogen. Dat maakt het moeilijk om ze netjes en zonder de pootjes te verbuigen in de IC-sokkelmodule te steken. Om dit te bereiken, zetten we de IC op de IC-former en schuiven hem langzaam naar voren tot aan het markeringsteken STOP.

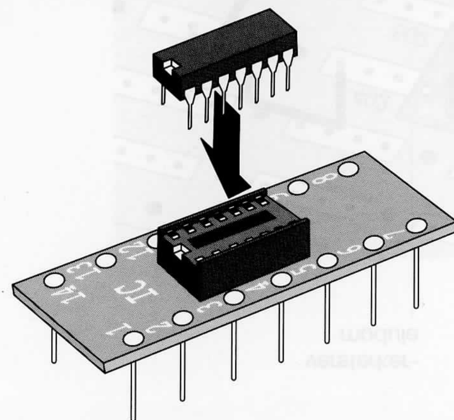


Montagetekening 32.
De aansluitingen van de ICs leveren nog wel eens problemen op.



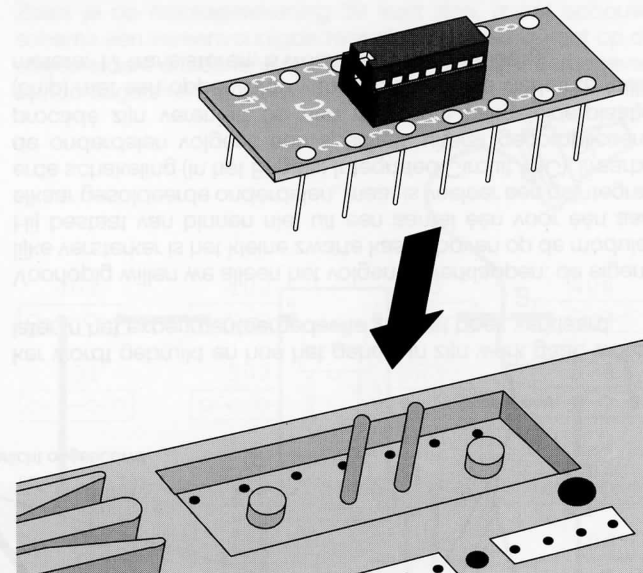
Montagetekening 33. STOP. Tot hier en niet verder!

Nu weer voorzichtig terugschuiven en vervolgens in de sokkelmodule steken. We moeten er wel goed op letten dat de inkeping die zich aan een van de korte zijden van de IC bevindt, bij het insteken aan dezelfde kant zit als de inkeping in de sokkel van de module. **Anders is de IC verkeerd gepoold en heb je kans dat hij stuk gaat!**



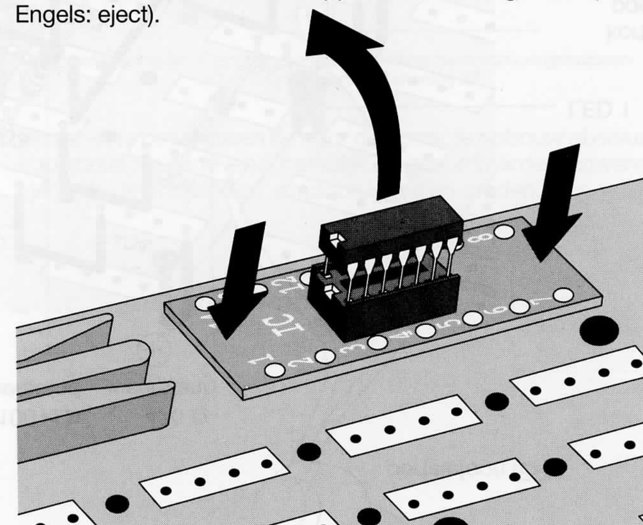
Montagetekening 34. Steek hem in de sokkel, maar let op dat je het goed doet!

Ook het wisselen van ICs is problematisch. Daarvoor dienen de beide tappen van de ejector op paneel 2.



Montagetekening 35.
Ook voor het wisselen is er een hulpmiddel, de ejector.

De sokkelmodule wordt met de gaten aan de onderkant van de printplaat boven op de tappen gezet en vervolgens wordt de printplaat omlaaggedrukt door voorzichtig en gelijkmatig op de vrije vlakken van de sokkelmodule te duwen. Op die manier wordt de IC door de beide tappen uit de voet gedrukt (in het Engels: eject).



Montagetekening 36. Dankzij de ejector komt onze IC onbeschadigd uit de sokkel.

Het eerste experiment

Voordat we echt gaan beginnen, eerst nog even een experiment als voorproefje. Hierin komen we iets meer te weten over de tekeningen en begrippen die in het experimenteergedeelte worden gebruikt.

Het waarschuwingsknipperlicht met klikgeluid, dat kan worden omgebouwd tot een toonfrequentiegenerator.
Voor het eerste experiment leggen we de volgende onderdelen gereed, bij voorkeur in het gatenrooster aan de linkerkant en de bovenkant van paneel 1:

Van multipack 1:
470 Ω weerstand, kleurcode: geel-violet bruin.
15 kΩ weerstand, kleurcode: bruin-groen oranje.
100 kΩ weerstand, kleurcode: bruin-zwart geel.
elco 100 µF.
Bovendien voor het ombouwen tot de toonfrequentiegenerator:
33 kΩ weerstand, kleurcode: oranje oranje-oranje.
En van multipack 2:
condensator 100 µF oftewel 0,1 µF (vgl. omrekentabel op paneel 1).

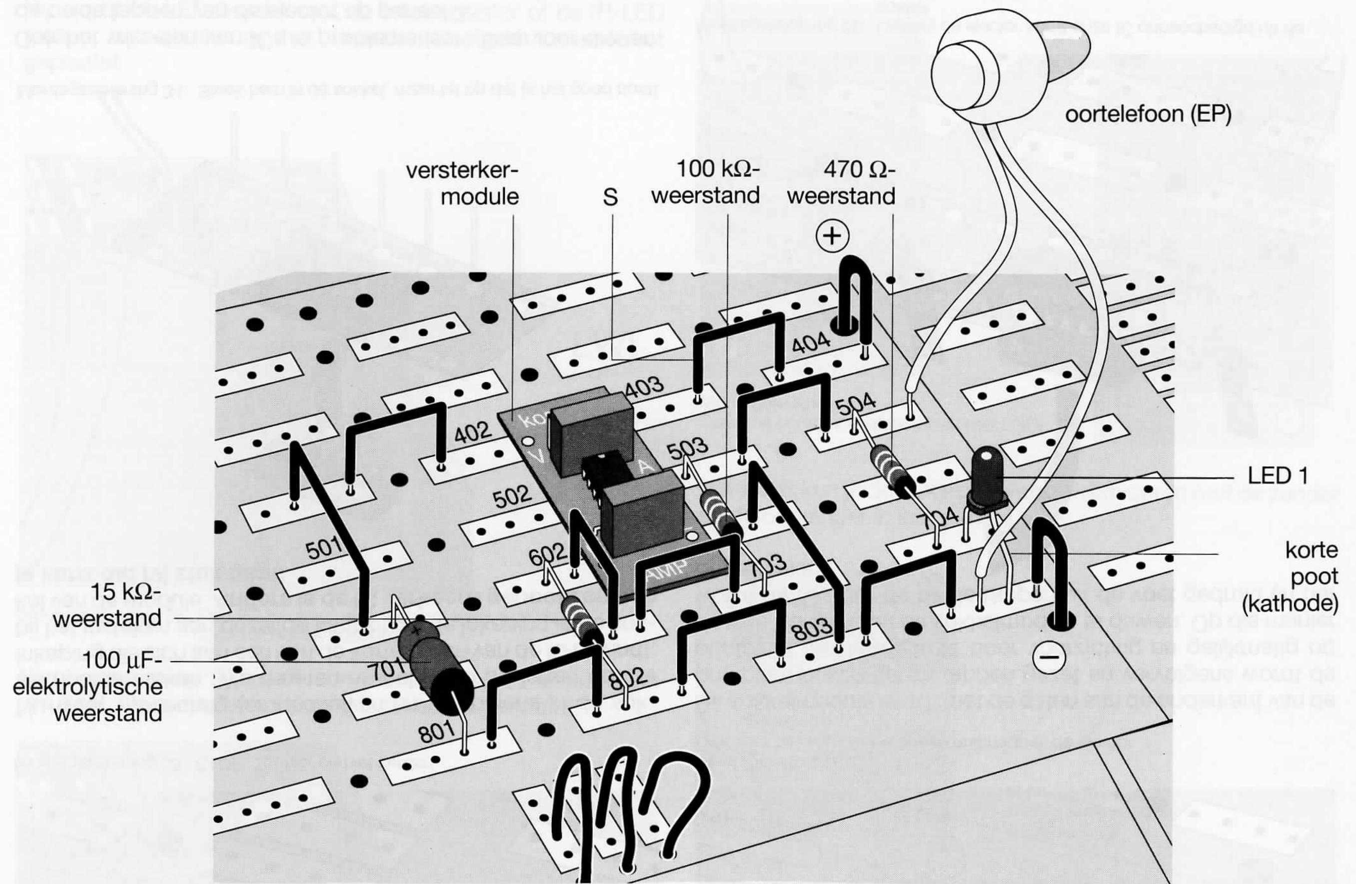
Van multipack 5 hebben we de versterkermodule (AMP, 043036), de rode licht-emitterende diode (LED, 000 145) en de oortelefoon (EP, 042 056, Multipack 4) nodig. Bovendien nog draadbruggen: acht korte en twee lange.

We rusten nu het experimenteerpaneel uit zoals aangegeven op montagetekening 37. In het algemeen kun je daarbij het beste als volgt te werk gaan:

1.) Eerst de modules opsteken (in dit geval de versterkermodule).
2.) Dan de wat plattere onderdelen zoals weerstanden, condensatoren en diodes.
3.) Nu de korte draadbruggen, vervolgens de lange.
4.) Dan komen de licht-emitterende diodes (LED) aan de beurt en/of de fototransistor (TF). Bij inbouw in paneel 1 de pootjes van deze onderdelen insteken.
Let op dat je altijd aan de juiste polariteit aansluit:
korte poot = kathode (K)
bij de fototransistor korte poot = collector (C).
5.) Indien nodig, daarna de lange einden draad insteken.
6.) Tenslotte de schakelaarbruggen "S" resp. "S1" en "S2".

Als iets niet werkt, kijk dan in het hoofdstuk "Opsporen van fouten" achter in het boek en volg de aanwijzingen op die daar worden gegeven.

De bedienings- en meldingselementen (potmeters, meetinstrument, luidspreker en instelbare condensator) hebben bij alle experimenten een vaste plaats in de klemveren.



Montagetekening 37. Zo wordt het waarschuwingsknipperlicht opgebouwd.

Al bestaat dit knipperlicht uit niet meer dan een half dozijn onderdelen, toch is het een technisch hoogstandje: de licht emitterende diode (LED) licht de hele tijd op en dooft dan weer en blijft uren-, dagen-, weken- en maandenlang knipperen zonder dat er iemand aan te pas komt en zonder dat er op mechanische wijze een verbinding tot stand wordt gebracht. Onze licht-emitterende diode knippert ongeveer twee keer per seconde, dat betekent, dat ze 172.800 keer per dag wordt in- en uitgeschakeld. Als je zou proberen een dergelijk knipperend vermogen uit een gewone lichtschakelaar te halen - we gaan dan even uit van een levensduur van 1 miljoen schakelingen - dan zou die nog geen week meegaan.
De kern van het waarschuwingsknipperlicht is de versterkermodule. Waarom voor een knipperlichtschakeling een versterker wordt gebruikt en hoe het geheel in zijn werk gaat, wordt later in het experimenteergedeelte van het boek verklaard.

Voorlopig willen we alleen het volgende verklappen: de eigenlijke versterker is het kleine zwarte kastje boven op de module. Hij bestaat van binnen niet uit een aantal één voor één aan elkaar gesoldeerde onderdelen, maar is veeleer een geïntegreerde schakeling (in het Engels: Integrated Circuit = IC), waarbij de onderdelen volgens een speciaal, uiterst gecompliceerd procádé zijn verenigd op een miniscuul halfgeleiderplaatje (chip) met een oppervlakte van slechts enkele vierkante millimeters: 17 transistoren, 6 weerstanden en 4 diodes.

Het kan ook langzamer

In een handomdraai kunnen we het knipperen vertragen: we vervangen de weerstand *R*2 van 100 kΩ door de weerstand van 33 kΩ. Als we nu ook nog via de oortelefoon naar het klikken luisteren, is het net of we een echt autoknipperlicht hebben gemaakt!

Van klikken naar piepen

Nu zullen we de elco *C*1 van 100 μF eens vervangen door een condensator van 100 nF. En wat blijkt? In de oortelefoon horen we een piepend geluid. Van ons waarschuwingsknipperlicht hebben we een toonfrequentiegenerator gemaakt!

Het kan nog hoger

We vervangen de weerstand van 33 kΩ weer door de weerstand van 100 kΩ en krijgen dan een nog hogere pieptoon te horen.

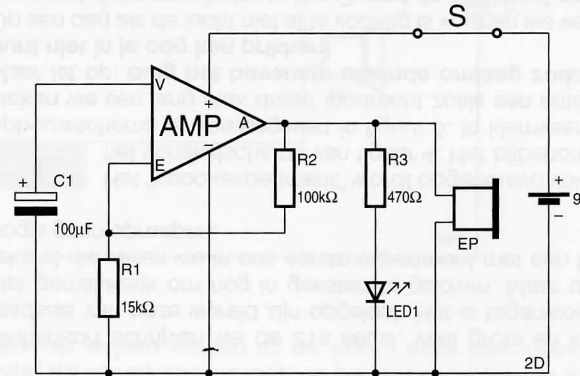
Snelle oren, langzame ogen

In beide experimenten konden we de snelle overgang van "aan" naar "uit", een paar duizend keer per seconde, in de licht-emitterende diode niet meer registreren. Alleen de lichtintensiteit is schijnbaar minder geworden. Ongeveer vanaf 20 keer aan-uit schakelen per seconde kunnen onze ogen het tempo niet meer bijhouden. Dit in tegenstelling tot onze oren, die dan pas goed beginnen te registreren.

Schakelschema en opbouwschema: De twee plaatjes van een schakeling

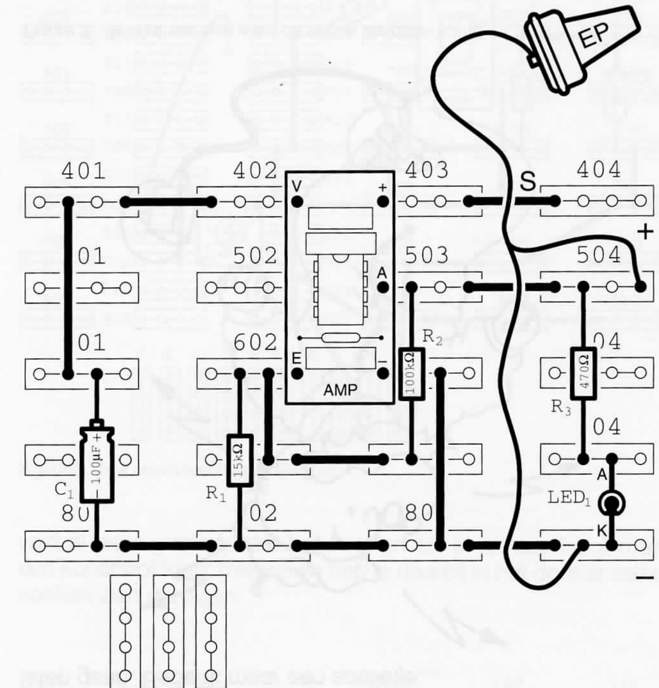
In ons experimenteerboek geven we bij elke schakeling twee verschillende afbeeldingen, namelijk het schakelschema en het opbouwschema. Het opbouwschema is bedoeld om de opbouw te vergemakkelijken; het laat ons zien hoe de onderdelen op de montageplaat van de panelen zijn gerangschikt en hoe de draden moeten lopen.
Het schakelschema daarentegen laat op vereenvoudigde wijze door middel van schakelsymbolen zien, welke onderdelen aaneengeschakeld zijn zonder dat daarbij rekening wordt gehouden met de werkelijke vorm en de exacte positie van die onderdelen. Het is bedoeld om op een overzichtelijke wijze de functie van een schakeling te verduidelijken en vormt het uitgangspunt van elk schakelingsidee. Schakelschema's worden in de vakliteratuur ook wel stroomkringschema's genoemd. Montagetekening 38 laat het schakelschema van ons elektronisch bestuurde knipperlicht zien.

De versterkermodule is voor het gemak alleen met een driehoekje aangegeven, ofschoon er op het printplaatje nog enkele condensatoren en een weerstand zitten die voor het functioneren van de versterker noodzakelijk zijn. We beschouwen de complete module als versterkereenheid en omdat versterkers in de elektronica altijd door een driehoekje worden gesymboliseerd, doen wij dat hier ook zo. In de lijst op pagina 5 hebben we alle in dit boek gebruikte symbolen voor onderdelen, de zogenaamde schakelsymbolen, op een rijtje gezet.



Montagetekening 38. Het schakelschema van het waarschuwingsknipperlicht.

Zoals je op montagetekening 39 kunt zien, is het opbouwschema een vereenvoudigde tweedimensionele variant op de uitgebreidere driedimensionele afbeelding zoals weergegeven op montagetekening 37.

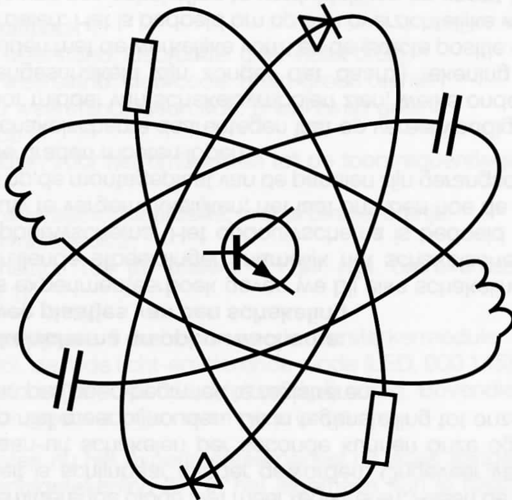


Montagetekening 39. Opbouw voor de schakeling "waarschuwingsknipperlicht" volgens montagetekening 38.

Dit schema bevat alleen de voor de correcte opbouw absoluut noodzakelijke gegevens, namelijk de genummerde klemveren alsmede de onderdelen, draadbruggen en draden.

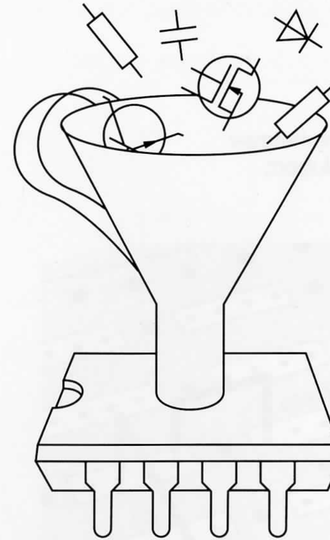
De kosmos van de elektronika

De elektronika is een wereld op zich. De belangrijkste bestanddelen ervan zijn de elektrische en elektronische *onderdelen*. Tegenwoordig zijn veel van die onderdelen samengevoegd tot grotere eenheden - tot *geïntegreerde schakelingen* op minuscule siliciumschijfjes, de zogenaamde chips.



Figuur 1. In de KOSMOS van de ELEKTRONIKA draait alles om halfgeleiders...

Kennis van de onderdelen en hun functies is de alfa en de omega, als je probeert te begrijpen hoe al die verschillende resultaten tot stand komen waarmee de moderne elektronika ons het leven gemakkelijker, rijker en leefbaarder maakt - van de zakrekenmachine, de radio of de pacemaker in onze directe omgeving tot de televisie- en communicatiesatellieten in het heelal.
Niemand haalt het in zijn hoofd om van de vierde verdieping naar beneden te springen, als hij de straat op wil. En op dezelfde manier waarop wij gebruik maken van de trap, stap voor stap en trede voor trede, gaan wij ons in de elektronika inwerken en haar haar geheimen één voor één ontlokken. En tenslotte zullen we verbaasd vaststellen dat alles heel logisch in zijn werk gaat, ook wanneer we - zoals in het volgende hoofdstuk - in het schemerdonker een "elektronische geestenbezwering" gaan uitvoeren.



Figuur 2. De Neurenbergse trechter van de micro-elektronika.

1. Elektronische geestenbezwering

Binnenkort schrijven we de 21e eeuw. Veel grote en kleine raadsels van onze wereld zijn opgelost. Het is tegenwoordig niet gemakkelijk om nog in geesten te geloven. Maar uitgerekend die willen we in ons eerste experiment met een knipoogje gaan oproepen.

1 Het "spookexperiment" wordt opgebouwd volgens het schakelschema van figuur 4. Het bijbehorende opbouwschema is weergegeven in figuur 5. In klemveer 606 steken we een lang stuk draad loodrecht zoals een antenne. Maar let op: **buig het bovenste uiteinde omlaag zodat de punt niet in je oog kan prikken!**
Op een dag als de lucht niet al te vochtig is vormen we vervolgens met duim en wijsvinger een O rond de "antenne" zonder die aan te raken, en schuifelen een paar keer stevig met onze schoenen met rubber- of leren zolen over het tapijt. Dan zul je direct een spookachtig piepend of krakend geluid horen.

2 Niet iedereen heeft de juiste schoenen met rubber- of leren zolen. Dan biedt een kunststof liniaal uitkomst. Wrijf er een paar keer stevig met een wollen doek over en houd hem vlak bij de antenne. De spoken laten van zich horen.

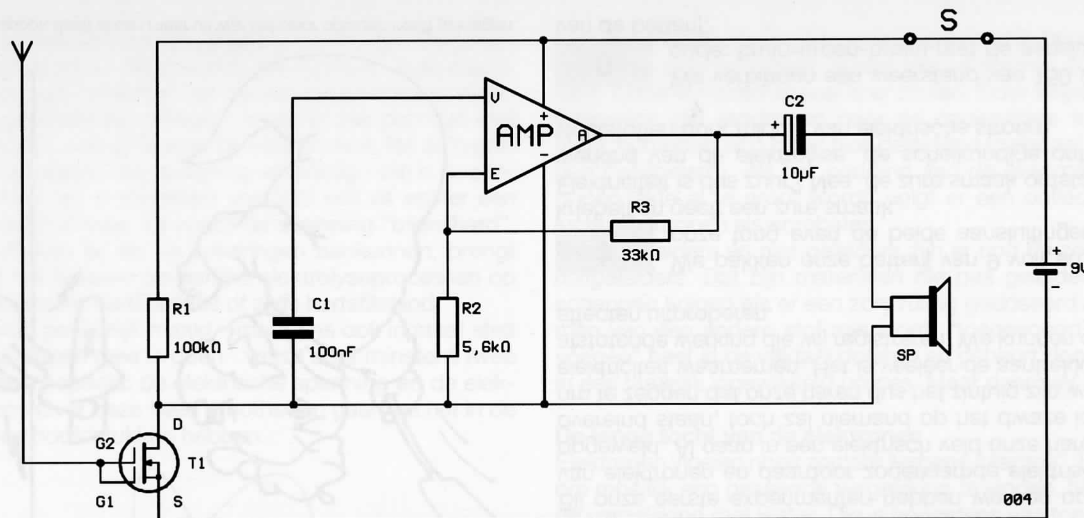
‚Insider-info 1
Figuur 4 is een typisch *schakelschema* van de elektronika. Het wordt ook wel *stroomkringschema* genoemd of kortweg *schakeling*. Zo'n afbeelding laat zien hoe de afzonderlijke onderdelen, de *bouwelementen*, elektrisch met elkaar worden verbonden. Ze zijn slechts schematisch als *schakelsymbolen* weergegeven (vgl. het lijstje op pagina 5). In tegenstelling tot het *opbouwschema* (figuur 5). Daar zijn de onderdelen net zo getekend als ze er in werkelijkheid uitzien. Zodat ook beginners meteen begrijpen wat er bedoeld is.
Meestal speelt zich in de schakeling alles af tussen de bedrijfsspanning U_B en *massa*. Dat is een "verzameldraad" die naar de min-pool van de batterij loopt. Hierop hebben de spanningswaarden betrekking. De benaming ervan doet denken aan de robuuste stalen chassis van oude radio's of ook wel aan het metalen raamwerk en het motorblok van auto's.

3 Je kunt nu de gekste dingen gaan uitproberen. Je kunt met je hand of de liniaal dichter bij de antenne komen of er wat verder van weg gaan, je kunt de spoken met één handbeweging het zwijgen opleggen of ze opnieuw tekeer laten gaan. Bedenk maar een spelletje....



Figuur 3. Je kunt wel zien waar dit spook vandaan komt!

4 Wie niet naar ze wil luisteren, kan de spoken zichtbaar maken. Daarvoor bouwen we - opnieuw voorzien van de antenne - de proef op zoals aangegeven in figuur 7.



Figuur 4. Spiritus electronicus: het spook dat velden hoorbaar maakt.

Op z'n laatst bij het experiment met de liniaal zal menigeen een licht zijn opgegaan. Zou dit spook soms *statische elektriciteit* heten?

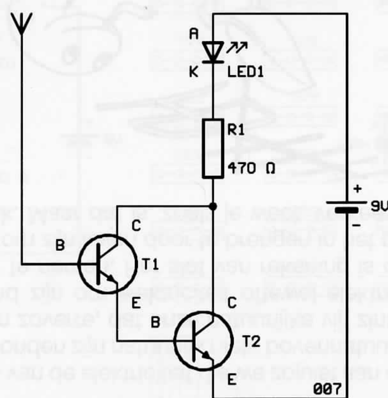
5 Om dit te controleren draaien we de waterkraan open, maar slechts zover dat er een dun straaltje uitloopt. Opnieuw wrijven we met een wollen doek over de liniaal en houden deze daarna vlak bij de waterstraal (figuur 9). Het spook dat eerder invloed uitoefende op onze elektronika, buigt nu de waterstraal - de spot drijvend met alle wetten van de zwaartekracht - in zijwaartse richting af.



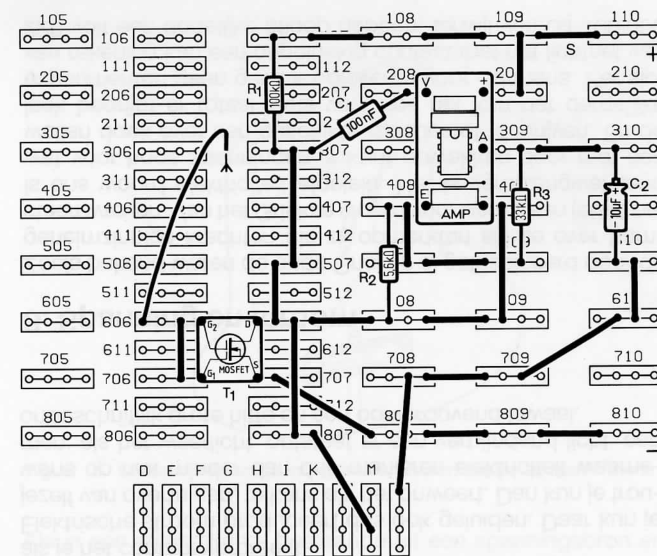
Figuur 6. Wie naarstig wrijvend werkzaam is, wekt heel wat spanning op!

Door het wrijven werden uit de wollen doek elektronen gekrabd die vervolgens massaal op het oppervlak van de liniaal gingen zitten, gereed om de sprong door de lucht naar andere voorwerpen te wagen, of anders door hun aanwezigheid alleen al elektrisch invloed uit te oefenen. De vakman zegt dat bij een opeenhoping van ladingdragers (dat zijn bijv. elektronen) *elektrische veldkrachten* werkzaam zijn. En dat is precies waarvan wij ons in onze experimenten konden overtuigen.

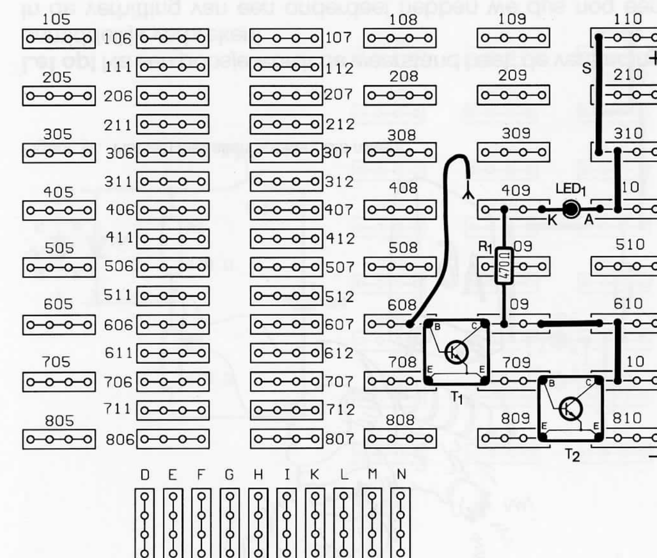
6 Dat elektronen inderdaad kunnen springen, zal ook uit andere waarnemingen blijken. Iedereen heeft vast al eens gemerkt dat het knettert als je je haar kamt met een kunststof kam; misschien heb je daarbij in het donker zelfs vonken zien springen.



Figuur 7. Spookachtige verschijnselen: lichtsignalen uit de andere wereld.



Figuur 5. Het opbouwschema bij figuur 4.

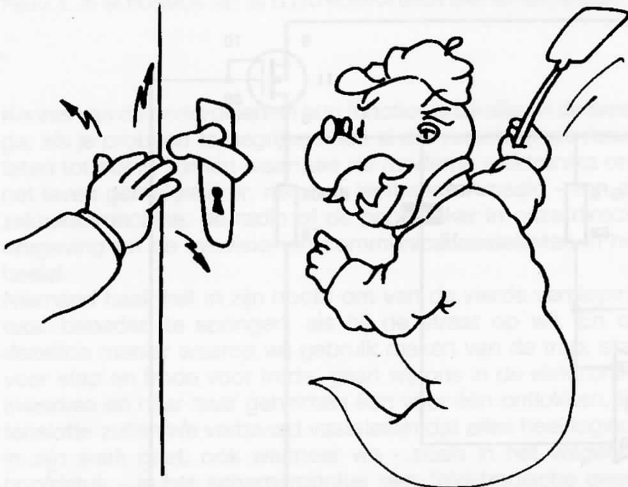


Figuur 8. Het opbouwschema bij figuur 7.



Figuur 9. Wichelroede: elektronen trekken water aan.

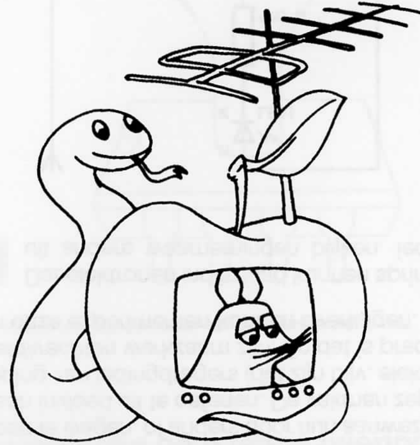
Buitengewoon onaangenaam is het soms, als je in een kamer met kunststof vloerbedekking de deurklink of een ander voorwerp van metaal aanraakt. Dan springt er een vonk over en krijg je een elektrische schok van jewelste!



Figuur 10. Het spook deelt alleen maar uit wat het door opladen heeft gekregen.

2. Boven-natuurlijke elektriciteit

De effecten van de elektriciteit die we zojuist aan den lijve hebben ondervonden zijn natuurlijk niets bovennatuurlijks. Of toch - namelijk in zoverre, dat onze natuurlijke vijf zintuigen er niet op berekend zijn om elektriciteit oftewel elektrische stroom direct waar te nemen. Per slot van rekening is de mens ooit ontworpen om zijn leven door te brengen in het paradijs, zonder techniek. Maar dat is, zoals je weet, verkeerd afgelopen.



Figuur 11. Als onze zintuiglijke waarneming het laat afweten...

Elektrische stroom is een gerichte beweging van *elektrische ladingdragers*. De kleinste daarvan zijn de *elektronen*. Daarover straks meer.
Bij onze eerste experimenten hebben we een opeenhoping van elektronen en daardoor zogenaamde elektrische velden opgewekt. Al gaan in een elektrisch veld onze haren duidelijk overeind staan, toch zal niemand op het dwaze idee komen om te zeggen dat onze haren dus het zintuig zijn waarmee we elektriciteit waarnemen. Het is veeleer de aantrekkende resp. afstotende werking die wij registreren. We kunnen ook andere effecten uitproberen.

7 We pakken onze batterij van 9 volt en raken met onze tong even de beide aansluitingen aan. Dat kriebelt en geeft een zure smaak.
Elektriciteit is dus zuur? Nee, de zure smaak ontstaat door de werking van de *elektrolyse*, de scheikundige ontleding van vloeistoffen door middel van elektrische stroom.

8 We verbinden een weerstand van 150 Ω (kleurencode: bruin-groen-bruin) met de aansluitklemmen van de batterij.



Figuur 12. Het zijn niet allen spoken, die roken!

Let op! Na een poosje wordt de weerstand heet; de verbinding onmiddellijk verbreken!
In de verhitting van een onderdeel hebben we dus nog een effect van elektrische stroom leren kennen. De kleine "spiraal" (*spiraalgloeidraad*) in gloeilampen bijvoorbeeld wordt zo heet (2000 tot 3000 ^{o}C) dat hij helder begint te gloeien en licht uitstraalt.

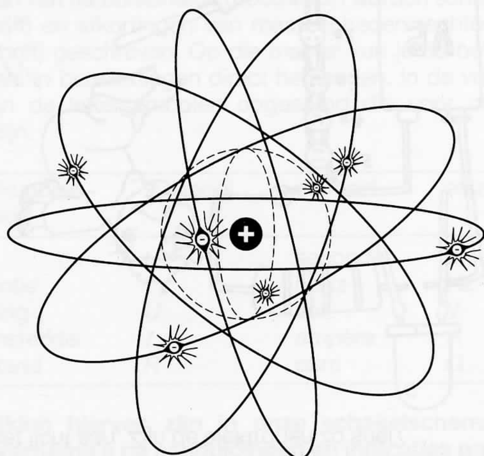
We houden de aansluitpennen van de oortelefoon even tegen

9 de beide batterijklemmen. Er klinkt duidelijk een knetterend geluid als je contact maakt en nog eens als je het contact verbreekt.
Elektrische stroom produceert dus ook geluiden. Daar kun je jezelf van overtuigen, telkens als het onweert. Dan kun je trouwens op niet minder dan drie manieren elektriciteit waarnemen: als het weerlicht, ontstaat er een verblindend licht, een onbeschrijflijk grote hitte en een oorverdovend lawaai.

3. Spanning en stroom

Zoals bekend waren de oude Grieken al gefascineerd door de geheimzinnige krachten die zij opmerkten als ze over barnsteen wreven. Van het Griekse woord voor barnsteen (*elektron*) is ons woord *elektriciteit* afgeleid. Het is verbazingwekkend wat voor hoge spanningen je kunt opwekken door met een wollen doek over een geschikte isolatiestof te wrijven. En de leek begrijpt er totaal niets van, hoe het kan dat dergelijke experimenten geen gevaar opleveren voor de mens. Per slot van rekening kan een ongelukkig contact met het lichtnet van 220 volt een dodelijke afloop hebben, terwijl van de 100.000

volt (!) op de kunststof kam hoogstens je haren voor een poosje overeind gaan staan. Waar het op aan komt is, zoals meestal in het leven, wat "erachter" zit. Op de kleine kam kan weliswaar een hoge spanning ontstaan, maar er kan zich niet veel energie ophopen, ook al vliegen de vonken eraf. Na zo'n ontlading is er nauwelijks nog spanning voorradig - die is "ineengestort". Achter het stopcontact van 220 volt zit echter een complete krachtcentrale. Zij houdt de spanning "bikkelhard", vult zoveel stroom bij als de zekeringen aankunnen, brengt zodoende in het lichaam gevaarlijke elektrolyseprocessen op gang en veroorzaakt hartfibrillatie of zelfs hartstilstand.
Wat elektriciteit gevaarlijk maakt - maar ons ook in staat stelt om er nuttige dingen mee te doen - wordt door minstens twee eigenschappen bepaald: de elektrische spanning **en** de elektrische stroom. Over deze twee grootheden gaan we het in de volgende twee hoofdstukken hebben.



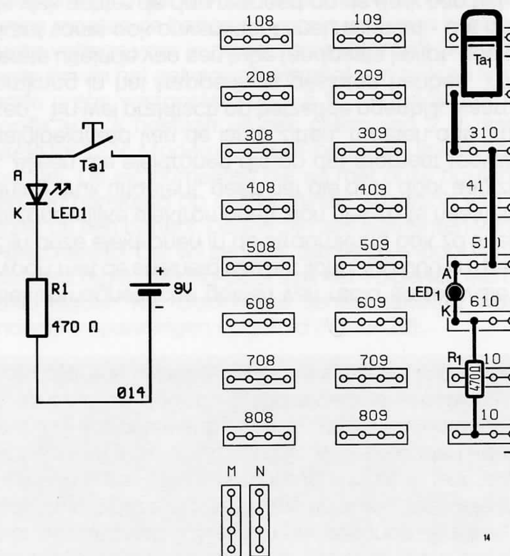
Figuur 13. Eenvoudig atoommodel: stikstofatoom met vijf elektronen op de buitenste schil.

Maar eerst nog even dit voor een goed begrip: onweer is een uitzonderlijk geval. "Normaliter" wordt onze stroom in geregelde banen geleid: in draden, meestal van koper of stroken folie. Als metaal is koper een goede *geleider*. Metalen bestaan uit kristalroosters. De atomen liggen netjes gerangschikt naast, boven en onder elkaar. Rond hun kernen draaien in verschillende banen de elektronen (figuur 13). De buitenste nemen het niet zo nauw met hun "trouw" aan hun atoomkern en verhuizen naar de dichtstbijzijnde of ook wel naar een wat verderop wonende atoom-buurman. In de geleiders vindt dus een beweging van elektronen plaats. En een gerichte beweging van elektronen noemt men *elektrische stroom*. De stuwende kracht daarvoor is de *elektrische spanning*.
Met die stuwende kracht schiet je echter niet veel op als alle elektronen "trouw" zijn, d.w.z. als ze stevig verankerd zijn in hun atoomverband en zodoende onbeweeglijk blijven. Stoffen met zulke eigenschappen noemt men *isolatoren* of niet-geleiders. Onze kunststof lineaal is er zo een. Door wrijving lukt het weliswaar zijn elektronen naar de oppervlakte te brengen, maar zij kunnen zich in het niet-geleidend materiaal niet bewegen ("afvloeien"). Als het gedrag van de elektronen aan de oppervlakte al te groot wordt, volgt er een ontlading via de lucht: elektronen als acrobaten.
Naast geleiders en niet-geleiders zijn er nog de zogenaamde *halfgeleiders*. Dat zijn materialen die pas geleidende eigenschappen krijgen als er een zorgvuldig gedoseerd aantal atomen van een andere stof aan wordt "toegevoegd". Dit "toevoegen" heet in de vaktaal *doteren* en gebeurt door verhitting in een tamelijk ingewikkeld proces. Maar daarover later meer.

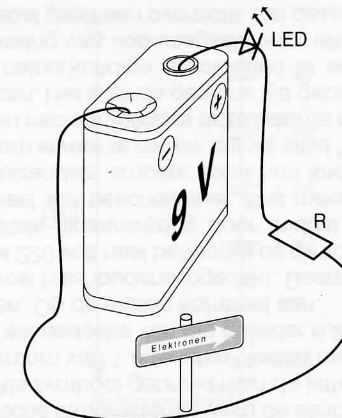
De lange tocht van de elektronen

Elektronen vloeien nooit zomaar "ergens naar toe". Het is daarom moeilijk een passende vergelijking te vinden, bijvoorbeeld de vergelijking met water. Die is hoogstens van toepassing bij een gesloten kringloop (koelwater met pomp b.v.). We spreken terecht van de *stroomkring*. Alleen wanneer die gesloten is, kan de stroom erin vloeien.

10 We bouwen de stroomkring op zoals aangegeven in figuur 14 en houden de licht-emitterende diode in het oog. Zolang Ta1 openstaat blijft de diode donker. Door op Ta1 te drukken wordt de kring gesloten. Nu geeft de diode licht.

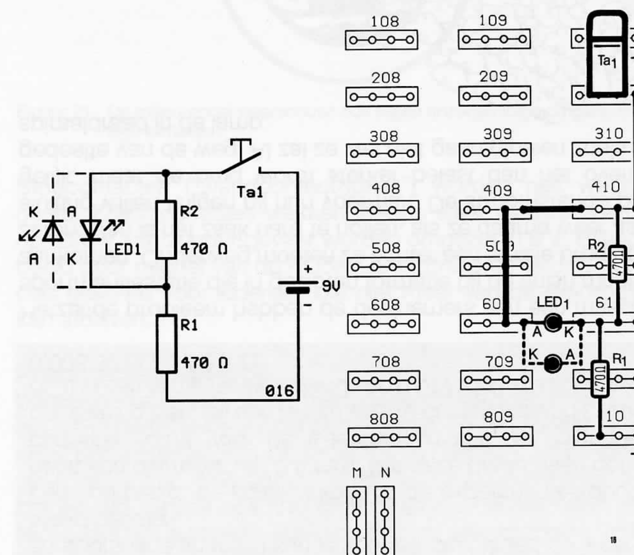


Figuur 14. Stroomstarter: pas door een druk op de toets wordt de kring gesloten.



Figuur 15. Chaos in het rondgaande (stroom)verkeer: diodes als spookrijders.

Als je een stroomkring, bestaande uit een spanningsbron en een "consument", sluit, oefent de spanning "druk" uit op de elektronen. Deze geven toe aan die druk en zetten zich in beweging. Door middel van haar *polariteit* bepaalt de batterij de richting van de beweging. Omdat elektronen negatieve ladingdragers zijn, gaan ze van min naar plus. Ook al werd plus vroeger als overschot gedefinieerd. De diodenpijltjes getuigen van deze misvatting. We omschrijven die beschaamd met het begrip *technische stroomrichting*. De elektronen vloeien pre



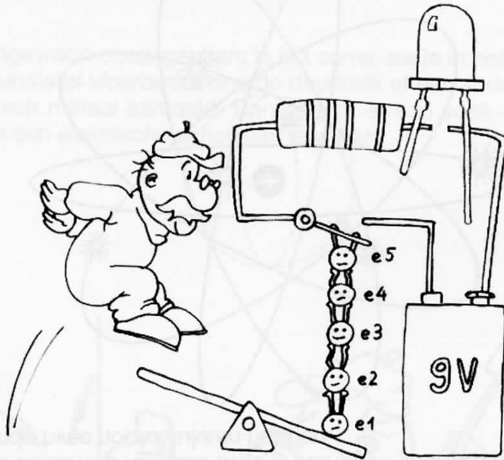
Figuur 16. Zo geeft LED1 licht. Maar andersom?

cies in de tegenovergestelde richting - de *natuurkundige stroomrichting*.

11 We breiden onze stroomkring van figuur 14 uit met een tweede weerstand (figuur 16). De licht-emitterende diode straalt nu niet meer zo'n helder licht uit. Vervolgens sluiten we de diode andersom aan. Nu blijft ze helemaal donker.
Voor diodes is de stroomrichting dus van belang.

12 We monteren de licht-emitterende diode weer zó dat ze licht geeft. Nu draaien we de onderste weerstand *R*1 om. De schakeling werkt precies zo als daarnet.
Voor weerstanden maakt het dus niet uit, hoe de stroom er doorheen gaat.

13 Nu maken we een klein uitstapje naar het trappenhuis en drukken op de lichtschakelaar. Direct gaat overal het licht aan. Zijn de elektronen zo snel?



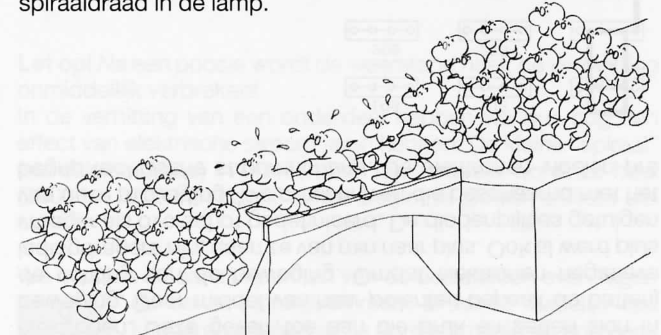
Figuur 17. De laatste knipt het licht aan!

Insider-info 2
Hoe traag elektronen zich bewegen in een koperen geleider laat het volgende voorbeeld zien. Stel, door een koperen draad met een diameter van 0,5 mm en een lengte van 60,4 mm vloeit een stroom van 1 A, dat zijn 6,25 x 10^{18} elektronen per seconde. In de koperen draad met de gekozen afmetingen staan ongeveer 10^{21} vrije elektronen voor de stroom ter beschikking. De snelheid waarmee de elektronen zich in de geleider voortbewegen (de *driftsnelheid*) berekent men door de stroomsterkte (uitgedrukt in elektronen per seconde) te vermenigvuldigen met de lengte van de geleider en te delen door het aantal vrije elektronen. Als je wilt, mag je het uitrekenen. Voor wie te lui is om dat te doen, is hier de uitkomst: 0,378 mm per seconde. Om een indruk te geven van deze extreem lage snelheid: een elektron dat vanuit een batterij door een draad van 10 m lengte op weg gaat naar een gloeilamp, heeft 26.455 seconden - dat is een kleine 7,5 uur oftewel bijna een normale werkdag - nodig om, na zijn weg door de draad afgelegd te hebben, eindelijk zijn bijdrage te leveren aan het schijnsel in de gloeilamp.

De elektromagnetische golven van radio en televisie planten zich voort met de snelheid van het licht: 300.000 km per seconde. Zijn onze elektronen in de stroomkring ook zo snel?
Het afzonderlijke elektron hoeft zich niet zo te haasten. Als de spanning druk uitoefent, geeft het die druk door aan zijn buurman. Alleen die elektronen die op dat moment toevallig in de spiraalgloeidraad van de lamp zitten, moeten dan "mee aanpakken". En wel praktisch op hetzelfde ogenblik waarop wij de stroomkring in het trappenhuis gesloten hebben. Wie in het achterste uiteinde van een tube tandpasta knijpt, boekt aan de voorkant soms ook onverwacht snel resultaat - dat is de massa die vlak achter de dop reageert op de druk aan het uiteinde van de tube. Hoe groter de opening, des te meer massa komt naar buiten. Hoe groter de doorsnede van een geleider, des te meer elektronen kunnen tegelijkertijd met gemak naast elkaar bewegen, terwijl ze aan de druk van de spanning toegeven. Als op een bepaalde plaats de ruimte wat krap wordt, moet gewoon het tempo worden opgevoerd, want de stroom in de stroomkring is overal even groot. Halve doorsnede op een bepaalde plaats betekent dan dubbele driftsnelheid.

Insider-info 3
Technici houden zelden rekening met vrije elektronen. De lengte en de diameter van geleiders kan men echter gemakkelijk vaststellen. Daarbij geldt: hoe groter de diameter en hoe korter het stuk geleider, des te geringer is zijn weerstand en des te beter geleidt het.
De verschillende metalen geleiden echter niet allemaal even goed. Als bij de projectie van een lange-afstandsleiding uit overwegingen van kosten of gewicht wordt gekozen voor aluminium in plaats van koper, moet men daarvoor een diameter aanhouden die bijna 1,7 keer zo groot is als voor koper. Aan elk materiaal wordt een zogenaamde *soortelijke weerstand* toegekend. Hij wordt meestal aangegeven voor 20 °C, omdat deze grootheid afhankelijk is van de temperatuur. Voor koper bedraagt deze weerstand, gesymboliseerd door de Griekse letter rho, 0,0175 $\Omega mm^2/m$. Zilver is met een waarde van 0,0163 slechts een fractie beter, maar duurder. Aluminium scoort 0,0294 en ijzer haalt 0,13 Ω^2/m.
Als je rho vermenigvuldigt met het quotiënt van lengte (in m) en doorsnede (in mm^2) kun je voor elk stuk draad de weerstand bepalen.
Een voorbeeld: de schakeldraad in de experimenteerdoos heeft een diameter van 0,5 mm. Dat deze draad geen concurrentie vormt voor de weerstanden laat de volgende berekening zien. Bij een lengte van 10 cm resulteert dit voor *R*Cu in een minieme weerstand van 0,0175 x 0,1/0,25^2 x π = 0,008.92 Ω = 8,92 mΩ.

Hetzelfde probleem hebben de deelnemers aan een massale sportmanifestatie die in gesloten formatie bij de finish moeten aankomen. Onderweg moeten ze echter een smalle brug passeren. Dan is het zaak hard te hollen, als ze daarna weer aansluiting willen krijgen bij hun voorman. De stroomsterkte blijft gelijk, maar de brug wordt sterker belast dan het overige gedeelte van de weg. Al zal ze wel niet gaan gloeien zoals de spiraaldraad in de lamp.



Figuur 18. Overal gelijke stroomsterkte. Wrijving op het smalle weggedeelte, maar de karavaan trekt (in gesloten formatie) verder.

Je kunt het aantal deelnemers per seconde vaststellen door te tellen en gebruik te maken van een stopwatch - op een willekeurige plaats langs de weg.
Voor de elektrische stroomsterkte werd de eenheid *ampère* (A) gedefinieerd. Als symbool gebruikt men de letter *I*. Om in een geleider een stroom van 1 A te laten vloeien moeten zich elke seconde door elk gedeelte van die geleider 6,25 triljoen elektronen bewegen. Op de massa komt het aan.
Met 16 A zijn veel huishoudens ingedekt. Daarmee kun je aan het lichtnet met 220 volt heel behoorlijk uit de voeten. Polshorloges met digitale tijdaanwijzing door middel van vloeibare kristallen zijn heel wat bescheidener. Niet meer dan pak-weg één honderdduizendste ampère hoeft hun knoopcel van 1,5 volt te leveren om ervoor te zorgen dat wij altijd "bij de tijd" zijn. Als "10 µA" (tien microampère) is deze waarde natuurlijk gemakkelijker te lezen. Het is sinds geruime tijd gebruikelijk om het hanteren van natuurkundige grootheden te vereenvoudigen door de toepassing van voorvoegsels voor elk duizendvoud. De volgende tabel geeft een overzicht van deze voorvoegsels.

factor	macht van 10	voorvoegsel	symbool
1.000.000 (miljoen)	10^6	mega	M
1.000 (duizend)	10^3	kilo	k
0,001 (duizendste)	10^{-3}	milli	m
0,000.001 (miljoenste)	10^{-6}	micro	µ
0,000.000.001 (miljardste)	10^{-9}	nano	n
0,000.000.000.001 (biljoenste)	10^{-12}	pico	p

Symbolen van natuurkundige grootheden worden schuin (cursief schrift) en afkortingen van maateenheden rechtop (normaal schrift) geschreven. Op die manier kun je de betekenis van letters in berekeningen direct herkennen. In de volgende tabel zijn de lettersymbolen opgesomd die voor ons van belang zijn.

natuurkundige grootheid	symbool	eenheid	afkorting
tijd	*t*	seconde	s
frequentie	*f*	hertz	Hz
spanning	*U*	volt	V
stroomsterkte	*I*	ampère	A
weerstand	*R*	ohm	Ω

In afwijking hiervan zijn in onze schakelschema's en opbouwschema's de aanduidingen en indicaties om technische redenen op verschillende manieren weergegeven. Zo geldt bijvoorbeeld: R1 = *R*1 = R_1; C1 = C1 = C_1 enz.

De kracht die elektronen vooruitduwt
Elke beweging vereist een kracht. Zelfs vallen kunnen we alleen maar omdat de zwaartekracht bestaat. De kracht die elektronen vooruitduwt wordt spanning genoemd - verkort aangeduid met het symbool *U*, gemeten in *volt* (V).

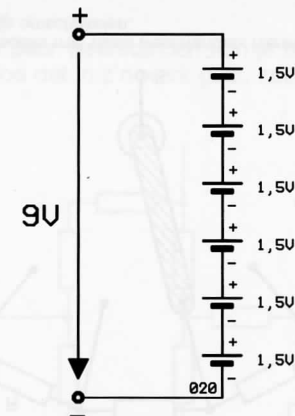
Insider-info 4
Bliksemschichten en vonken uit de kam hebben één ding gemeen: ze banen zich met geweld een weg door een niet-geleider, namelijk de lucht. Opeenhopingen van elektronen wekken elektrische velden op. Hun veldsterkte wordt berekend aan de hand van de formule $E = U / d$. U is de spanning tussen de opeenhoping en het voorwerp waar de vonk tijdens een onweer naar toe springt (afstand: *d*). Bij pieken ontstaat een gedrang van veldsterktelijnen. Hoge veldsterkten leiden tot splijting van de neutrale elektronen, zodat geladen ionen ontstaan, en hup, daar springen de elektronen in de taxi die hen naar hun tegenpool brengt. Vvrrroemm. Bedenk wel: wanneer twee metalen voorwerpen tegenover elkaar staan met een afstand van 0,01 mm, veroorzaakt de spanning van een batterij van 9 volt al een veldsterkte van 900 V/mm tussen die twee voorwerpen! Bij moderne transistoren en geïntegreerde schakelcircuits worden doorgaans nog kleinere afstanden op de chip aangehouden. Zodoende leidt een kleine spanning al tot een gevaarlijk hoge veldsterkte.

Spanning wordt door middel van *generatoren* in de krachtcentrale opgewekt of door scheikundige werking in batterijen. Als het niet gelijk 100.000 V zijn, die weleens via de lucht gecompenseerd kunnen worden, dan blijven de elektronen daarbij netjes opgesloten in een draad. Een batterij kan dus, zuiver "elektrisch" beschouwd, niet "leeglopen". Daar is een volgens de regels gesloten stroomkring voor nodig.

14 We bouwen weer een stroomkring op volgens de aanwijzingen in figuur 14. Vergeet de druktoets niet! Zolang deze open blijft staan, gebeurt er niets. De aanliggende spanning wordt pas effectief als we op Ta1 drukken: de licht-emitterende diode laat zien dat er nu stroom vloeit. Voor de levering van energie aan de huishoudens hebben de Europese landen gekozen voor 220 V (op het ogenblik is men bezig met de overschakeling op 230 V). Alle apparaten en machines met netvoeding zijn daarop afgestemd. Buiten dit energienet gaat het er veel vrijer toe. Je moet dus wel oppassen: welke spanning moeten de batterijen voor je walkman hebben, wat is het juiste voltage voor je zakrekenmachientje? Ooit werd door het gebruik van het *galvanisch element* van zink en koolstof de onderste grens vastgesteld op 1,5 V. De *loodaccumulatoren* van onze auto's bestaan uit zes cellen van 2 V, aaneengeschakeld tot 12 V. Moderne *lithium-batterijen* leveren ongeveer 3 V per cel. De experimenten die wij met onze bouwdoos uitvoeren zijn berekend op een *nominale spanning* van 9 V. Die halen we uit een batterij. Daarin zijn zes elementen van 1,5 V *in serie geschakeld*. Dat wil zeggen, dat de plus-pool van het eerste element tegen de min-pool van het volgende element aan ligt enz. (figuur 19). Door deze serieschakeling worden de afzonderlijke spanningen opgeteld (figuur 20).



Figuur 19. Een energieblok van 9 V, door de deskundige geopend en gefotografeerd: zes platte cellen in serie.



Figuur 20. Zo zien technici een batterij van 9 V.

Batterijen zijn verbruiksartikelen. Als ze leeg zijn ruimen we ze milieuvriendelijk op - door ze bij de verkoper van batterijen in de verzamelbak te deponeren.


Figuur 21. De milieu-engel waarschuwt ook tegen onzorgvuldige omgang met lege batterijen.

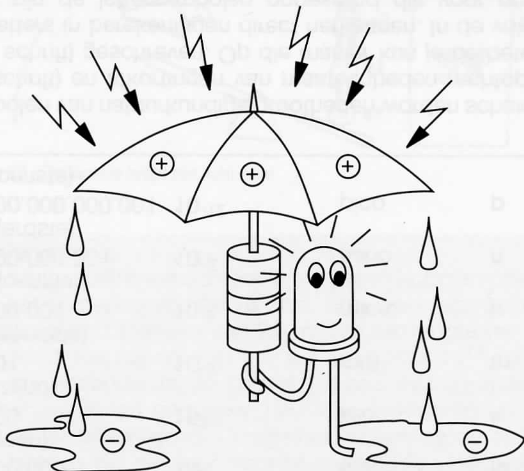
Stopcontacten ("wandcontactdozen") worden niet weggegooid. Krachtcentrales wekken steeds weer nieuwe energie op. 220 V kan zonder gevaar worden omgezet in 9 V. Bijvoorbeeld door middel van de *KOSMOS-nettransformator X* - precies geschikt voor iedereen die niet meer van de elektronika kan afblijven...

Prestatiemaatschappij
Wij zijn dus allemaal "stroomverbruikers". Intussen weten we, dat de stroom van de elektronen niet kan vloeien zonder spanning. De prestaties van de stroom - van het licht uit de gloeilamp tot de krachttoer van de motor van de wasautomaat - zijn het gevolg van de saamhorigheid van stroom **en** spanning. Niet zoals bij de vonken schietende kam: veel spanning, maar nauwelijks stroom. Waar het op aankomt, is het *vermogen* - het produkt van spanning en stroom, dus $P = U \times I$. Er kunnen

evenwel pas prestaties worden geleverd als het vermogen gedurende een bepaalde tijd actief is. En dat karweitje knapt de elektro-energie voor ons op. Onvermoeibaar, zolang als we willen (en het kunnen betalen). Daarom is een onweer ongeschikt als energieleverancier: het levert weliswaar veel spanning en tijdens de ontlading in de bliksem ook hoge stroom, maar slechts voor een fractie van een seconde.

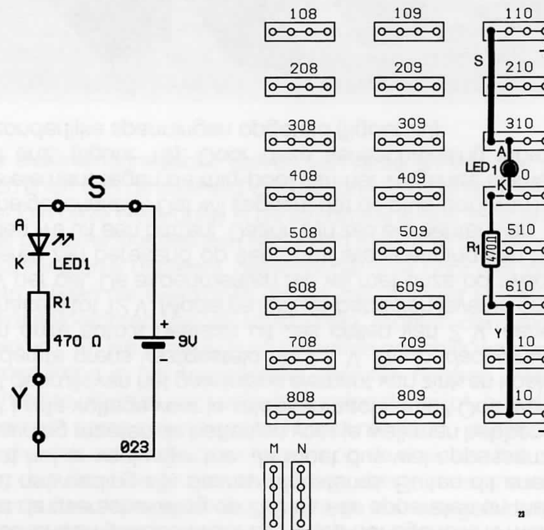
4. Weerstand ter voorkoming van catastrofes

Na al die droge theoretische kost gaan we weer over tot de praktijk. Experimenten staan op het menu. Onze "proefkonijnen" zijn die kleine gekleurde worstjes die weerstanden worden genoemd. Zij worden in schakelschema's en formules aangeduid met het symbool *R*. Hun eenheid is het *ohm* (symbool: Ω). Een weerstand met een waarde van 150 Ω hadden we eerder voor verwarmingsdoeleinden gebruikt in experiment 8. Dat was al een demonstratie van vermogen: elektrisch vermogen werd (door de wrijving van de elektronen in de weerstand) omgezet in warmte.
Een ander doel waarvoor weerstanden worden gebruikt leren we in de volgende experimenten kennen: ze zijn onontbeerlijk voor de beveiliging van licht-emitterende diodes. Wat er zo bijzonder is aan de structuur van een diode dat ze niet zonder bescherming mag worden blootgesteld aan een spanning, wordt in hoofdstuk 7 nader verklaard. Maar wat we nu al kunnen verklappen, is het volgende: een licht-emitterende diode (of kortweg LED) heeft om licht te kunnen uitstralen maar een paar milliampère nodig en bovendien een spanning van minder dan 2 V. Een batterij met $U = 9$ V heeft dus 7 V méér dan bevorderlijk is voor de licht-emitterende diode. Wat doen we met de rest?



Figuur 22. Beveiliging: in plaats van de doodsteek voor de licht-emitterende diode een spanningsval over de weerstand.

15 We bouwen de stroomkring op zoals aangegeven in figuur 23. De waarde van de weerstand bedraagt 470 Ω (geel-paars-bruin). Aan de licht-emitterende diode ligt niet meer dan 2 V (dat zou je met een voltmeter kunnen meten). De weerstand heeft als een spanningsdief 7 V ingepikt.



Figuur 23. Verandering in een eenvoudige stroomkring: de waarden zijn beslissend, de volgorde doet er niet toe.

De spanning die over de licht-emitterende diode "staat" wordt *LED-spanning* genoemd. Zoveel spanning heeft ze namelijk nodig om de stroom aan het vloeien te krijgen. Als je ze echter rechtstreeks op de batterij aansluit, loop je de kans dat ze het niet overleeft! **Gebruik licht-emitterende diodes daarom altijd samen met een beveiligingsweerstand!**

16 We verwisselen de volgorde van licht-emitterende diode en weerstand en stellen vast: de volgorde in de stroomkring speelt geen rol. Het is echter wel van belang, dat de licht-emitterende diode in de "vloeirichting" van de stroom wordt gepoold: het langste pootje is de pluskant (*anode*). Het pijltjessymbool wijst in de richting van de afgeplatte kant (*kathode*). Daarover later meer. **Houd je altijd precies aan de opbouwschema's!**

17 We nemen weerstanden met hogere waarden voor onze schakeling en letten op wat er gebeurt (bijv. 1 kΩ: bruin-zwart-rood, 5,6 kΩ: groen-blauw-rood, 10 kΩ: bruin-zwart-oranje, 15 kΩ: bruin-groen-oranje, 33 kΩ: oranje-oranje-oranje).

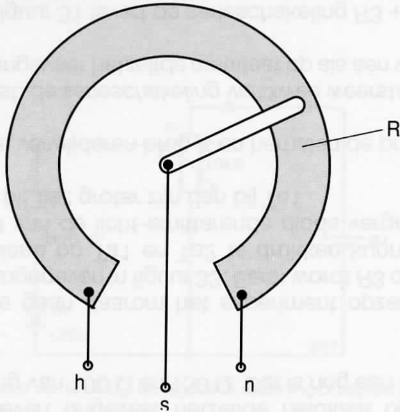
18 We monteren opnieuw de weerstand van 470 Ω, maar trekken dit keer de lange draadbrug Y eruit en vervangen die door de tweede weerstand van 470 Ω.
We stellen vast: hoe hoger de weerstand is in de stroomkring, des te zwakker is het licht dat de licht-emitterende diode uitstraalt. Voordat we ons gaan bezighouden met de wetmatigheden van deze werking, eerst even iets over een kleine slordigheid in het taalgebruik. Eigenlijk heeft het woord weerstand in de elektronika twee betekenissen. Enerzijds wordt het gebruikt om een eigenschap van een geleidend materiaal ten opzichte van de elektrische stroom aan te geven: het materiaal biedt een zekere weerstand tegen de elektrische stroom die in een getalswaarde uitgedrukt en als zodanig in berekeningen toegepast kan worden. Aan de andere kant is het de benaming voor elektrische bouwelementen van de meest uiteenlopende vorm.

Laat honderd bloemen bloeien!
Met weerstanden hebben we in de elektronika voortdurend te maken. En stellig het meest met die "gekleurde worstjes" waar we het al over gehad hebben: een laagje koolstof of metaal, op keramiek gebrand en beschermd met een laagje lak. Zolang ze in de schakeling niet bruin worden of zelfs gaan roken, zijn ze correct aangebracht. Als er echter met een grotere stroomsterkte en spanning (vermogen!) wordt gewerkt, is er meer oppervlakte en warmtevast materiaal nodig. In dat geval is weerstandsdraad, die op keramische buisjes wordt gewikkeld en eventueel van een deklaag wordt voorzien, een geschikt middel. Deze weerstanden hebben het graag warm zonder dat ze bezwijken. Met behulp van weerstanden kun je spanningen "delen"; uit 9 V kun je dus bijvoorbeeld 2 x 4,5 V halen. Met een aantal weerstanden in serie geschakeld en een aftakschakelaar die contact maakt met de verbindingspunten, krijg je dan een *spanningsdeler* die je (meer of minder nauwkeurig) kunt instellen (figuur 24).

R
n
h
S

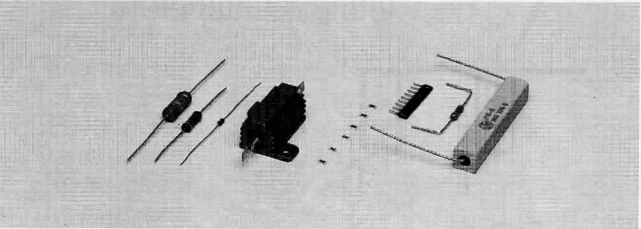
Figuur 24. Spanningsdeler met vaste weerstanden: hiermee kun je alleen trapsgewijs omschakelen.

Je kunt echter beter in de winkel een kant-en-klaar-produkt kopen waarmee je elke tussenliggende waarde kunt instellen. Zo'n onderdeel heet een *potentiometer*. De technicus die graag iets kort en krachtig onder woorden brengt, spreekt van een *potmeter*. Ook die heb je in allerlei types, met een koollaag (figuur 25) of met draad, met een as voor een draairegelaar of met een spleet voor de schroevendraaier. Of in de vorm van een schuifregelaar zoals je ze in de discotheek aantreft. Wat ze allemaal gemeen hebben is de loper. Daarom hebben potmeters (minstens) drie aansluitingen.



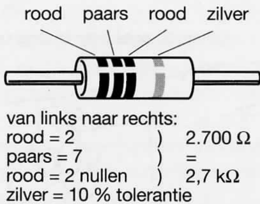
Figuur 25. Spanningsdeling door middel van de potentiometer: elke tussenliggende waarde is instelbaar.

Figuur 26 laat een kleine verzameling vaste en instelbare weerstanden zien die in de praktijk worden gebruikt.



Figuur 26. Een grote verscheidenheid onder één vlag: voor (vrijwel) elk geval een weerstand.

Kleuren in zicht
De op het bouwonderdeel aangegeven weerstandswaarde geeft uitsluitsel over de eigenschappen ervan. Bij grotere types vaak door middel van een getal, bij de overige in de vorm van gekleurde ringen. Die kun je namelijk altijd zien ongeacht de positie van het onderdeel in de schakeling. En om het de fabrikanten niet te moeilijk te maken bestaat er een zekere "tolerantie" met betrekking tot de nominale waarde. De werkelijke waarde mag wel enkele procenten afwijken van de op het onderdeel aangegeven waarde, al naar gelang het assortiment. De toegestane tolerantie is trouwens ook aangegeven in de vorm van een gekleurde ring. In figuur 27 en 28 vind je enkele voorbeelden, terwijl de in figuur 29 weergegeven tabel een handig hulpmiddel is om je deze belangrijke code in te prenten. Het is tenslotte niet handig als je die telkens moet gaan opzoeken.



van links naar rechts:
rood = 2) 2.700 Ω
paars = 7) =
rood = 2 nullen) 2,7 kΩ
zilver = 10 % tolerantie

Figuur 27. Zo wordt een weerstand "gedecodeerd".



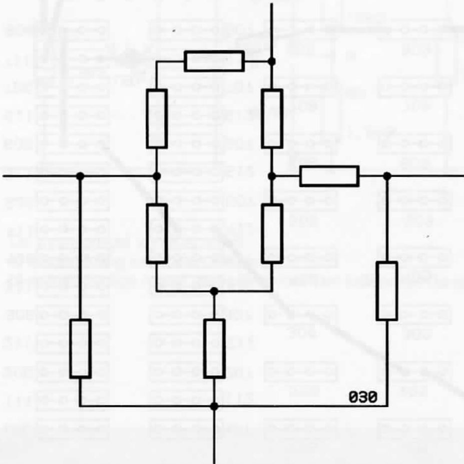
van links naar rechts:
bruin = 1) 100.000 Ω
zwart = 0) =
geel = 4 nullen) 100 kΩ
goud = 5 % tolerantie

Figuur 28. Dat is duidelijk: dit is een weerstand van 100 kΩ met een tolerantie van 5 %.

Kleur	1e ring (1e cijfer)	2e ring (2e cijfer)	3e ring (aantal nullen)	4e ring (tolerantie)
zwart	0	0	–	
bruin	1	1	0	± 1 %
rood	2	2	00	± 2 %
oranje	3	3	000	
geel	4	4	0 000	
groen	5	5	00 000	
blauw	6	6	000 000	
paars	7	7		
grijs	8	8		
wit	9	9		
goud			x 0,1	± 5 %
zilver			x 0,01	± 10 %
zonder ring				± 20 %

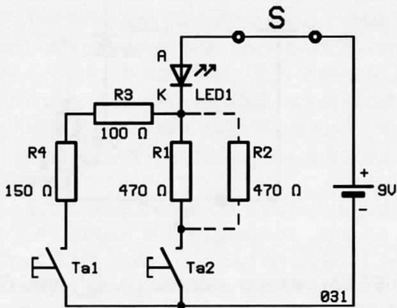
Figuur 29. Kleurcode.

Serie en parallel
Met slechts een paar weerstanden kun je heel wat waarden samenstellen. Hoe dat in z'n werk gaat, zullen we eens even onderzoeken.



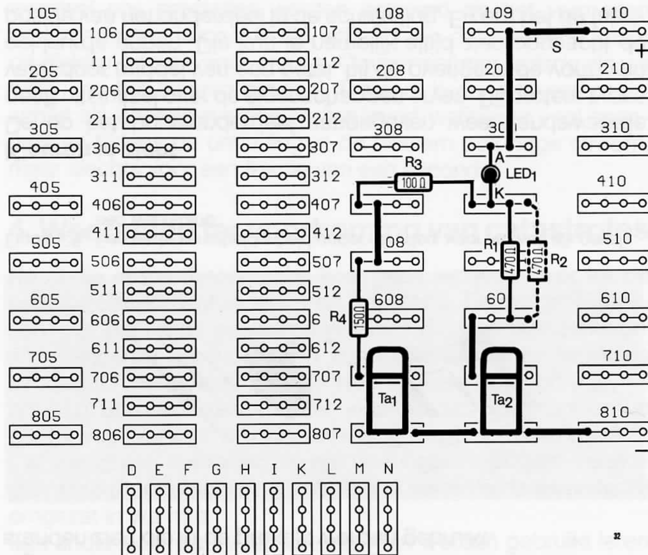
Figuur 30. Netwerken van weerstanden: knopen en mazen - Kirchhoff & Ohm proberen je in verwarring te brengen.

19 We bereiden een vergelijking voor zoals aangegeven in figuur 31, maar voorlopig nog zonder *R*2. Nu drukken we op Ta1 en "onthouden" de lichtsterkte van de lichtemitterende diode. Vervolgens drukken we op Ta2. De diode zal nu aanzienlijk minder licht geven.



Figuur 31. *R*3 + *R*4 ≈ *R*1 | | *R*2 (spreek uit: "parallel"): proef met combinatie van weerstanden in serie en parallel.

20 Nu monteren we *R*2 *parallel* aan *R*1 en herhalen de proef. De diode geeft nu in beide gevallen ongeveer evenveel licht.



Figuur 32. Het opbouwschema bij figuur 31.

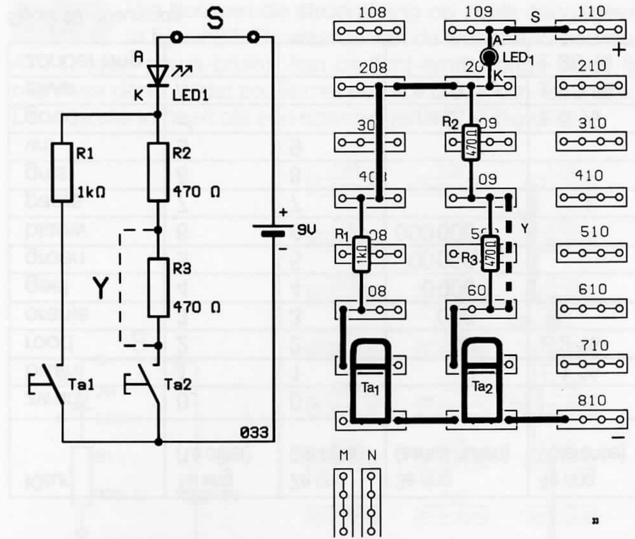
We stellen vast: de *parallelschakeling* van twee weerstanden van 470 Ω levert ongeveer hetzelfde resultaat op als een *serieschakeling* van 100 Ω en 150 Ω. Dat is nog een beetje onoverzichtelijk.

21 We gaan daarom het experiment opzetten zoals aangegeven in figuur 33. Eerst wordt *R3* overbrugd. Door afwisselend op Ta1 en Ta2 te drukken kunnen we de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode vergelijken. De intensiteit zal bij Ta2 groter zijn dan bij Ta1.

22 We verwijderen brug Y en herhalen de proef.

We stellen vast: de *serieschakeling* van twee weerstanden van 470 Ω levert ongeveer hetzelfde resultaat op als één weerstand van 1 kΩ.

Evaluatie: in figuur 31 levert de serieschakeling *R3* + *R4* = 100 Ω + 150 Ω een totale waarde op van 250 Ω. Dat is bijna hetzelfde resultaat als bij de parallelschakeling van *R1* en *R2* (elk 470 Ω). Het resultaat van deze parallelschakeling bedraagt 235 Ω. De verklaring van dit "mysterie": bij serieschakeling neemt de totale weerstand toe, bij parallelschakeling wordt hij kleiner. De (rekenkundige) reciproke (d.i. de omgekeerde waarde) van een weerstand wordt *geleidingsvermogen* genoemd. Bij een parallelschakeling wordt het geleidingsvermogen opgeteld. Dat wordt eenvoudig als volgt berekend: $1/R = 1/R1 + 1/R2$. Als er maar twee weerstanden zijn, kun je ook schrijven $R = (R1 \times R2)/(R1 + R2)$.



Figuur 33. Met brug zorgt Ta2 voor een grotere lichtintensiteit - zonder brug levert Ta1 hetzelfde resultaat als Ta2, immers: $R1 \approx R2 + R3$.

Gebruik bij je berekeningen wel altijd dezelfde machten van tien, of liefst "zuivere" maateenheden: bij voorkeur 1 x 10^3 Ω i.p.v. 1 kΩ. Anders zou het resultaat van je berekeningen wel eens een lelijke misrekening kunnen zijn!



Figuur 34. Drie keer een stap in de goede richting...

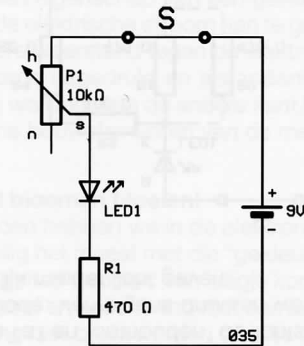
5. Spanning, stroom en weerstand - de wet van Ohm

Mensen stellen wetten op om de samenleving in goede banen te leiden. Dat er in de natuur orde heerst, daarvoor zorgen de natuurwetten. De mens hoefde die "alleen maar" te ontsluieren en in formules vast te leggen. Daarnet waren wij een goed eind op weg om dit voor de elektrische stroomkring te doen. Maar Georg Simon Ohm was ons te vlug af - hij heeft dat al in 1827 gedaan.

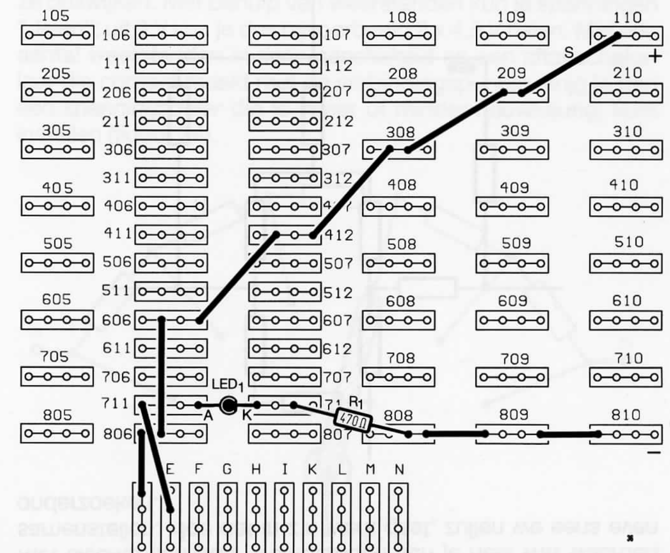
De weg naar Ohm

Vele wegen leiden naar Ohm. Dat zullen we dadelijk zien.

23 Zoals aangegeven in figuur 35 begeven we ons met de potentiometer van 10 kΩ, een weerstand van 470 Ω (ter voorkoming van catastrofes) en met een licht-emitterende diode op weg naar Ohm. Daarvoor draaien we aan de potmeter.



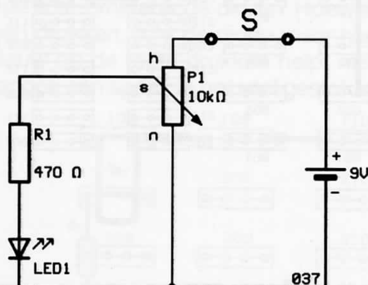
Figuur 35. Potmeter als "elastische" weerstand: hoe meer *R*, des te minder *I*.



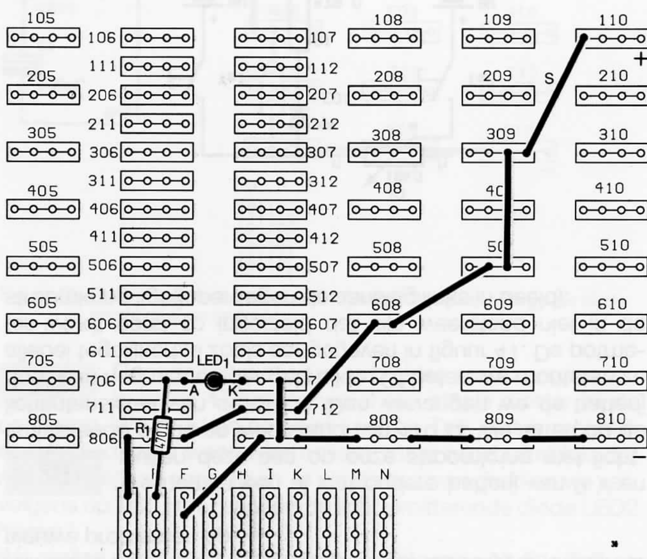
Figuur 36. Het opbouwschema bij figuur 35.

We stellen vast: hoe meer weerstand er tussen loper en vaste aansluiting is geschakeld, des te geringer is de lichtintensiteit van de diode. Omdat onze bedrijfsspanning U_B constant is, betekent dat: hoe meer weerstand, des te minder stroom (die ervoor zorgt dat de diode licht geeft).

24 We promoveren de potmeter tot spanningsdeler door de nog vrije aansluiting te verbinden met de min-pool van de batterij (figuur 37). De loper takt nu in de richting van de min-pool steeds minder spanning van U_B af. Opnieuw wordt de licht-emitterende diode dan steeds donkerder.



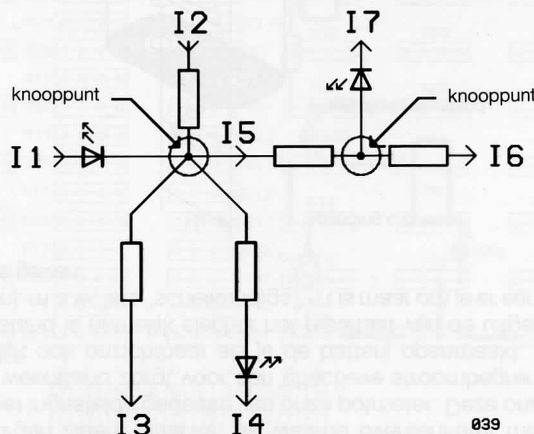
Figuur 37. Vrije keuze van 0 tot U_B: de afgetakte spanning U bepaalt de stroom I.



Figuur 38. Het opbouwschema bij figuur 37.

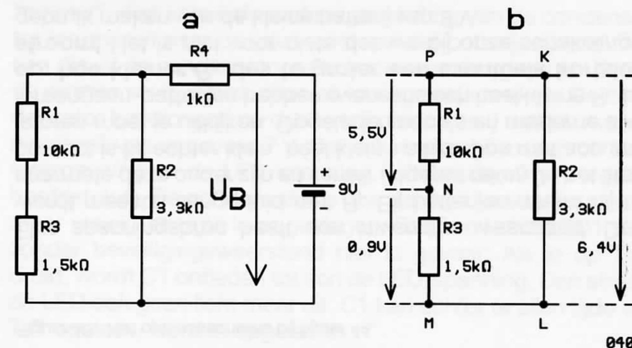
Onze conclusie luidt: hoe minder spanning (bij gelijke voorschakelweerstand), des te minder stroom.
Dus: constante spanning U, toenemende weerstand R - de stroom wordt minder;
constante weerstand R, afnemende spanning U - de stroom I wordt eveneens minder.
En zo eenvoudig is het verband:
$I = U/R$; $U = I \times R$; en dus ook $R = U/I$.

Insider-info 5
Helaas is een elektronische schakeling ingewikkelder dan de stroomkring. Om ze te kunnen berekenen moet je ze uiteenrafelen, in kleine stukjes opdelen. Daarvoor heeft meneer Kirchhoff twee handige wetten ontdekt en geformuleerd: de *knooppunt-* en de *mazenregel*.
De eerste regel komt hierop neer: de som van de stromen die in een knooppunt naar binnen vloeien is gelijk aan de som van de uitvloeiende stromen. Stroom kan niet verloren gaan zoals bijvoorbeeld water dat uit een poreuze draad lekt! Figuur 39 laat een fragment van een schakeling zien met een dergelijk knooppunt. Voor wiskundigen:
$I1 + I2 = I3 + I4 + I5$; $I5 = I6 + I7$.



Figuur 39. De knooppuntregel van Kirchhoff: wat naar binnen stroomt, stroomt ook weer naar buiten!

De tweede regel luidt: in een gesloten maas is de som van alle spanningen gelijk aan nul. Wat mazen zijn kun je zien als je naar een hek van draadgaas kijkt: aan de bovenkant vertakken zich de draden en aan de onderkant komen ze weer bijeen. Figuur 40 laat er een voorbeeld van zien.



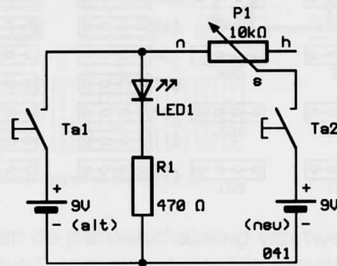
Figuur 40. De mazenregel van Kirchhoff:
a) stroomkring met twee mazen
b) enkelvoudige maas met pijlen voor het tellen van de spanningen.

Duidelijk?
Beginners hebben wellicht baat bij deze "korte handleiding voor de omgang met mazen":
1. Een gesloten kring wordt een *maas* genoemd. Soms zijn er alleen weerstanden in opgenomen, maar er kunnen ook spanningsbronnen in zitten.
2. De spanningen in een maas worden aangegeven met *referentierichtingspijlen*. Dat kan spanning van een batterij zijn of spanningsval over een weerstand.
3. De richting van de referentierichtingspijlen wordt gekozen overeenkomstig de technische stroomrichting. M.a.w., als door een weerstand een stroom van plus naar min vloeit, wordt de pijl eveneens van plus naar min getrokken.
4. Een maas wordt vanuit een beginpunt in de gekozen richting "in één ronde" doorlopen, tot je weer terug bent bij het beginpunt. Als je onderweg het achtereind van een spanningspijl tegenkomt moet je de bijbehorende spanning optellen, en als je de punt van een pijl tegenkomt moet je de spanning aftrekken.
Laten we nu eens kijken naar de maas in figuur 40b. De deelspanningen zijn hier al aangegeven. Je kunt ze meten (hoe je dat moet doen komt later aan de orde) of berekenen. We beginnen bij K en gaan in de richting van L één keer rond. Op deze "spannende" tocht komen we de volgende waarden tegen: van K naar L, achtereind van pijl bij K, dus +6,4 V. Van L naar M: geen spanningsverschil, dus 0 V. Van M naar N: pijlpunt bij M, dus -0,9 V. Van N naar P: weer een pijlpunt, dus -5,5 V. Van P naar K: 0 V. Einde van de reis. Totaal van de deelspanningen van deze maas: +6,4 V + (-0,9 V) + (-5,5 V) = 0 V.

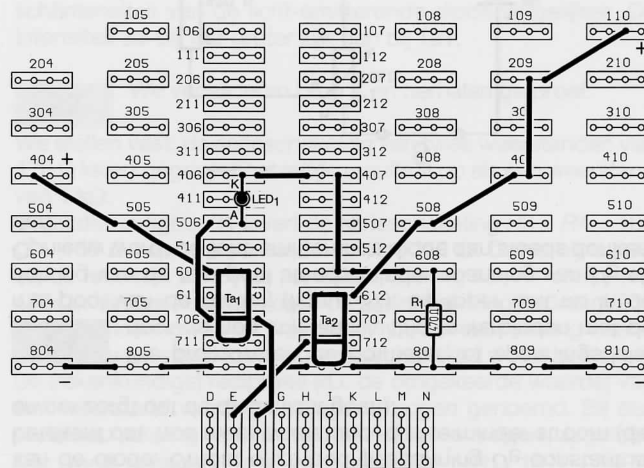
Ongrijpbare weerstand

Net als je denkt dat het je nou allemaal duidelijk is, duiken er nieuwe problemen op.

25 We nemen een al wat oudere batterij van 9 V en sluiten deze aan op onze stroomkring met licht-emitterende diode en weerstand van 470 Ω. We letten op de lichtintensisteit van de diode. Dan vervangen we de batterij door een nog niet eerder gebruikte. Of beter: we monteren ze allebei tegelijkertijd zoals aangegeven in figuur 41. De potmeter wordt eerst zo ingesteld dat zijn weerstand niet in de stroomkring ligt (loper tegen de aanslag links in beeld).



Figuur 41. Bij gelijke lichtintensiteit zowel met Ta1 als met Ta2: de ingestelde (deel-)waarde van P1 zit onzichtbaar verborgen in de oude batterij.

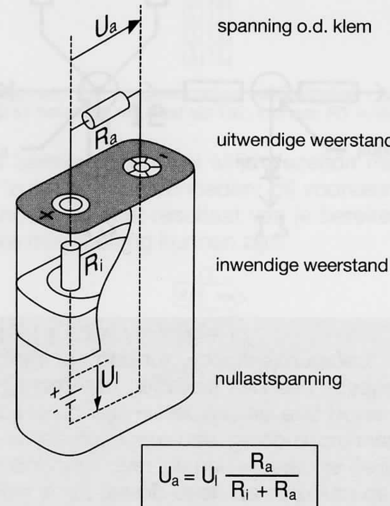


Figuur 42. Het opbouwschema bij figuur 41.

We stellen vast: de licht-emitterende diode geeft met de nog niet eerder gebruikte batterij een wezenlijk helderder licht dan met de oude - ondanks het feit dat op beide batterijen dezelfde spanning staat aangegeven (9 V)!

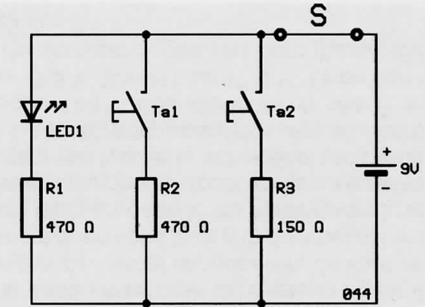
26 We draaien nu net zo lang aan de potmeter, totdat de licht-emitterende diode met de nog niet eerder gebruikte batterij "op net zo'n laag pitje" licht geeft als met de oude.

Conclusie: in de oude batterij moet een of andere weerstand verborgen zitten, waarvan de waarde overeenkomt met die van het ingestelde gedeelte van onze potmeter. Deze onzichtbare weerstand zorgt voor een effectieve stroombegrenzing. Hij blijft ook onzichtbaar als je de batterij openmaakt. Deze weerstand is namelijk slechts het resultaat van de uitgeputte batterij, m.a.w. iets "scheikundigs" - 't is maar om je er een idee van te geven.

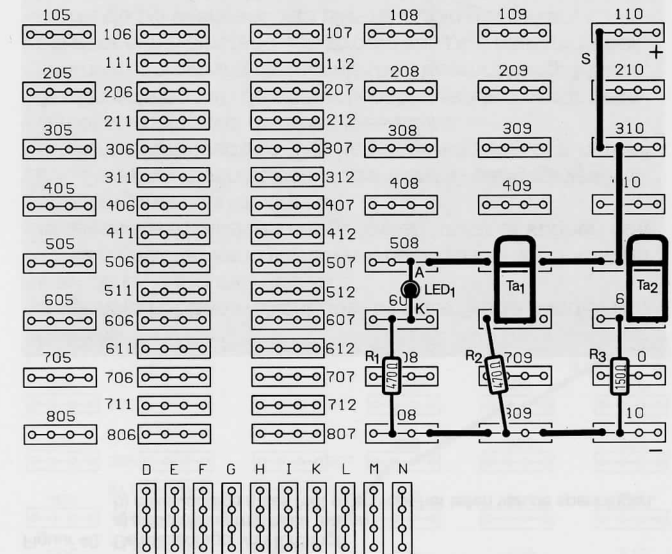


Figuur 43. Insiders houden ook rekening met fantomen!

27 Volgens de aanwijzingen in figuur 44 gaan we nu iets nuttigs bouwen - een testinstallatie voor batterijen van 9 V vrij naar McGyver: met de eenvoudigste technische middelen het beste resultaat behalen! Als nu de licht-emitterende diode amper nog licht geeft, zodra de te testen batterij is aangesloten, kun je deze batterij gevoeglijk bij het chemisch afval deponeren. Ook als de diode wel licht geeft, maar bij het sluiten van Ta1 aanzienlijk donkerder wordt, is het met de batterij afgelopen. De test met Ta2 tenslotte doorstaan alleen nog niet eerder gebruikte batterijen zonder dat de lichtintensiteit al te sterk afneemt.



Figuur 44. Zuinige oplossing à la McGyver voor een testschakeling voor batterijen: als LED1 ook met Ta2 licht geeft, is de batterij nog niet gebruikt. Als ze alleen nog maar bij geopende toetsen licht geeft, gaat de batterij niet lang meer mee.



Figuur 45. Het opbouwschema bij figuur 44.

Elke spanningsbron heeft een *inwendige weerstand*. Deze wordt meestal aangeduid met R_i. Bij batterijen neemt hij toe naarmate deze ouder zijn en verder uitgeput raken. In het stopcontact is hij echter klein, héél klein - altijd. Ook met accumulatoren moet je uitkijken. Opgeladen accu's en moderne alkali-mangaan-batterijen hebben eveneens een heel kleine R_i. **Let op: hoe kleiner R_i, des te groter een eventuele kortsluitstroom!** Het is niet voor niets dat we bij onze schakelingen gebruik maken van de kleine batterij van 9 V.

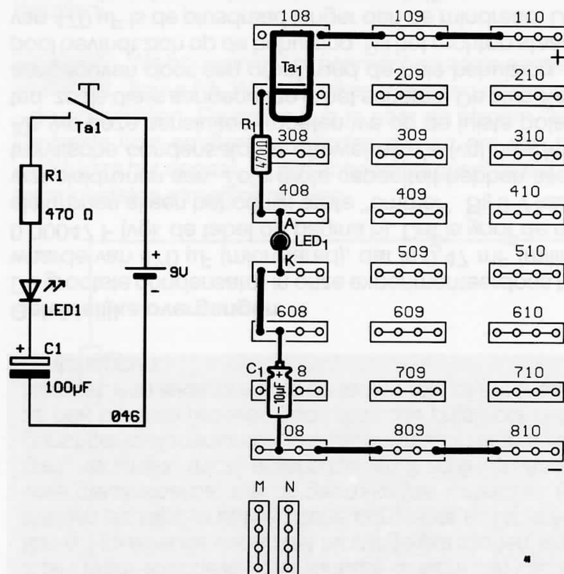
6. Condensator: een opslagplaats voor elektronen

Spanning, stroom, weerstand - in de stroomkring funktioneerde tenslotte alles zoals het hoort. Duidelijkheid dankzij Ohm. Maar al gauw gebeuren er weer rare dingen. Dat is te wijten aan een nieuw onderdeel in de stroomkring - een *condensator*.

Stroom in kleine hoeveelheden

Het woord condensator zou je kunnen vertalen met "ophoper". Wat wordt erin opgehoopt?

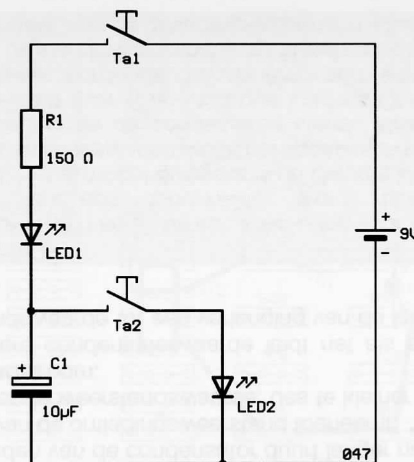
28 In de stroomkring voegen we een condensator in zoals aangegeven in figuur 46 en drukken op de toets. Wat doet de licht-emitterende diode? Hoewel we netjes op de toets blijven drukken, licht de diode maar heel eventjes op. En ook opnieuw op de toets drukken helpt niet. Zou hier soms weer een spook een spaak in het wiel gestoken hebben?



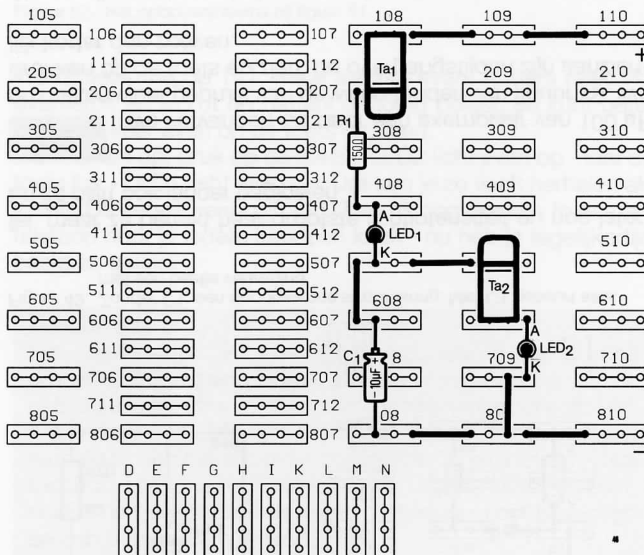
Figuur 46. Stroom raakt in het slop: LED1 gaat slechts even licht geven bij de eerste druk op de toets.

29 Door de schakeling uit te breiden zoals aangegeven in figuur 47 komen we al een stapje dichter bij de oplossing. We drukken nog een keer op Ta1. Het is mogelijk dat de diode dan weer even oplicht, maar noodzakelijk is dat niet. Ta1 blijft nu open staan. In plaats daarvan drukken we vervolgens op Ta2. Hoe reageert de licht-emitterende diode LED2 hierop?

We stellen vast: in de stroomkring, bestaande uit C1, Ta2 en LED2, staat de batterij "buitenspel". Toch licht LED2 even op



Figuur 47. Uitweg via Ta2: de condensator *C*1 geeft zijn lading af aan LED2 en kan via Ta1 weer worden opgeladen.



Figuur 48. Het opbouwschema bij figuur 47.

als je op Ta2 drukt. Dat spelletje kun je zelfs zo vaak herhalen als je wilt: als je op Ta1 drukt, licht LED1 even op; druk je vervolgens op Ta2 dan geeft LED2 een ogenblik lang licht enz. Via Ta1 "pompen" we met behulp van de batterij blijkbaar elektronen in de condensator - om precies te zijn vanuit de min-pool. Deze elektronen hopen zich op en vullen als het ware een "emmer". Wat vanuit de andere aansluiting van de condensator terugvloeit naar de (plus-pool van de) batterij, zijn elektronen die uit de condensator naar buiten worden gedrukt. Zodra de emmer vol is, wordt deze afvloeiing onderbroken. De condensator funktioneert nu dus tijdelijk als batterij met een spanning(sval) van ongeveer 7 V. Dat is het verschil tussen de batterijspanning en de LED-spanning (minder dan 2 V, vergelijk hoofdstuk 4). De condensator is dus een klein reservoir, al is er maar weinig energie in opgeslagen. Daarom komt LED1 ook zonder beveiligingsweerstand niet in gevaar. Als je op Ta2 drukt, wordt *C*1 ontladen tot aan de LED-spanning. Dan straalt de LED ook geen licht meer uit. *C*1 kan echter te allen tijde via Ta1 opnieuw worden opgeladen.

Vlakken op afstand gehouden

Een condensator bestaat in het eenvoudigste geval uit twee metalen platen die op een bepaalde afstand tegenover elkaar worden geplaatst en geen geleidende verbinding met elkaar hebben; ze zijn dus van elkaar geïsoleerd. In de praktijk van de techniek wordt echter geen gebruik gemaakt van platen maar van flinterdunne, gemetalliseerde folies, gescheiden door een net zo dunne isolatiefolie. De isolatielaag tussen de condensatorplaten wordt *diëlektricum* genoemd. Hoe groter het oppervlak van de metaalfolie en hoe dunner de isolatielaag, des te groter is de capaciteit van de condensator. Deze wordt aangeduid met het symbool *C* en uitgedrukt in de eenheid *farad*, afgekort F. De batterij in de stroomkring transporteert elektronen naar de min-pool van de condensator, en wel zoveel als er daar op kunnen. Ze zitten alleen aan de oppervlakte en daarom kan men volstaan met een zeer dunne folie. Om ruimte te besparen worden de stroken trouwens vaak opgerold. Hoe meer druk (spanning) er op de condensator wordt uitgeoefend, des te meer elektronen neemt hij op. De spanning dringt via het elektrisch veld door de tussenliggende isolator heen en komt dan op de andere metaalstrook. Daarvandaan slaan net zoveel elektronen op de vlucht in de richting van de plus-pool als er aan de min-pool aankomen.

Het geval van het elektrisch veld heeft veel weg van de situatie "wolk tegen kerktoren" tijdens een onweer. Alleen zou in dit geval door de klap de condensator worden vernietigd. Daarom staat - al dan niet gecodeerd - op de condensator de maximaal toelaatbare spanning aangegeven.

Insider-info 6

Het elektrisch veld werkt ook in het vacuüm. Het niets volstaat dus als isolator tussen de condensatorplaten. Met lucht gaat het ook.

De capaciteit wordt berekend met de formule $C = \varepsilon_0 \cdot S/d$. Hierbij is *S* de oppervlakte (maar één kant berekenen!) en *d* geeft de afstand aan. Om de eenheid farad te verkrijgen heb je voor de condensator in het vacuüm nog de *elektrische veldconstante* ε_0 (de Griekse kleine letter epsilon) nodig. Die

bedraagt 8,859 x 10^{-14} As/Vcm. Farad werd gedefinieerd als de capaciteit waarbij een stroom van 1 A in 1 s tot een spanningsverandering van 1 V over de condensator leidt. De ampèreseconde is de maat voor de lading, symbool *Q*. Voorbeeld: de afstand tussen twee veercontacten op ons experimenteerpaneel bedraagt in veel gevallen niet meer dan ongeveer 0,25 cm. Hun gezamenlijk oppervlak bedraagt ongeveer 1,7 cm^2. Zodoende zou de capaciteit van een dergelijk paar veercontacten in het vacuüm (en praktisch ook in de lucht)
$C = 8{,}859 \times 10^{-14} \times 1{,}7/0{,}25 = 0{,}6 \times 10^{-12}$ F = 0,6 pF bedragen. Vanwege de kunststof stijgt de capaciteit tot ongeveer 2 pF. Want effectiever dan vacuüm of lucht zijn vaste isolatoren. Hoeveel de capaciteit bij dergelijke stoffen stijgt vertelt ons de *relatieve diëlektrische constante* ε_r. Dit is een zuivere getalswaarde, die bij gebruikelijke isolatoren (papier, glas, keramiek, mica) ergens tussen 3 en 6 ligt. Aanzienlijk gunstiger is aluminiumoxyde. Dit ontstaat in elco's zoals we ze ook bij onze proeven gebruiken. De prijs voor het kleine formaat: een lekstroom die de lading min of meer snel doet "ontsnappen".

Geleidelijke overgangen

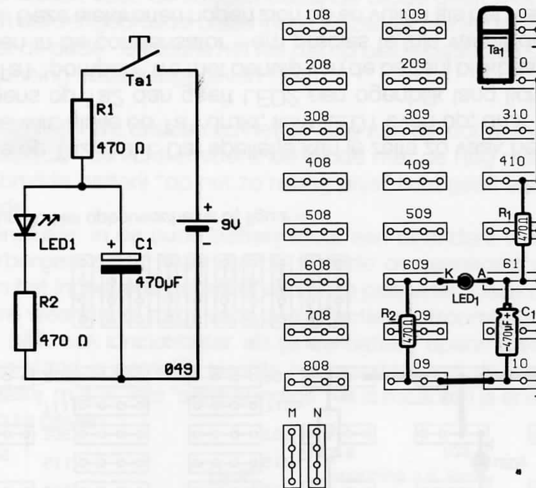
De grootste condensator in onze experimenteerdoos heeft een waarde van 470 µF (microfarad), dat is 0,47 mF (millifarad) of 0,00047 F (vgl. de tabel op pagina 6). Dat is voor de miniscule elektronen al een behoorlijk grote "emmer". Bij 9 V kan hij heel wat elektronen aan. Zo'n grote capaciteit hebben alleen elektrolytische condensatoren oftewel *elco*'s (vgl. insider-info 6). Als we deze aansluiten, moeten we op de juiste polariteit letten, zoals die is aangegeven in het schema. De plus-kant wordt aangegeven door een groef rond de hele behuizing. De minpool bevindt zich op de behuizing. Bij het rechtop staande type van 470 µF is de plusdraad langer dan de mindraad. De behuizingen zijn ook voorzien van een opschrift.

30 We bouwen het experiment op zoals aangegeven in figuur 49, maar laten de condensator voorlopig nog even weg. Als we op de toets drukken, reageert LED1 zoals bekend: ze blijft licht geven tot we de toets loslaten. Nu nemen we ook *C*1 op in de schakeling. Wat gebeurt er nu als we op Ta1 drukken?

We stellen vast: de licht-emitterende diode heeft nu niet meer zoveel haast en zal slechts geleidelijk een helderder licht geven. Ook als we de toets loslaten, reageert ze niet meteen - ze gloeit nog een poosje na.

31 We verhogen de weerstandswaarde van *R*1 en *R*2 tot 1 kΩ resp. 1,5 kΩ. Wat verandert er?

We merken op: weliswaar het licht van LED1 is nu iets minder



Figuur 49. Zonder *C*1: een doodgewone stroomkring. Met *C*1 gebeurt alles met een beetje vertraging.

fel, maar ze bereikt haar grootste lichtintensiteit nu nog later. En ze blijft ook langer nagloeien.

32 We vervangen *C*1 door een exemplaar van 100 µF en maken weer gebruik van de weerstanden van figuur 49. We drukken op de toets en zien: de overgangstijden zijn aanzienlijk korter dan zoëven.

Als we alles wat we uit deze experimenten te weten zijn gekomen, op een rijtje zetten, dan blijkt het volgende:
- de serieschakeling van *R* en *C* vertraagt het inschakelen van de licht-emitterende diode;
- het ontladen van de condensator duurt langer naarmate de waarde van de ontladingsweerstand toeneemt;
- hoe hoger de weerstandswaarde, des te kleiner is de laad- en ontlaadstroom;
- een hogere condensatorwaarde leidt net als een hogere weerstandswaarde tot een verlenging van de laad- en ontlaadtijd.

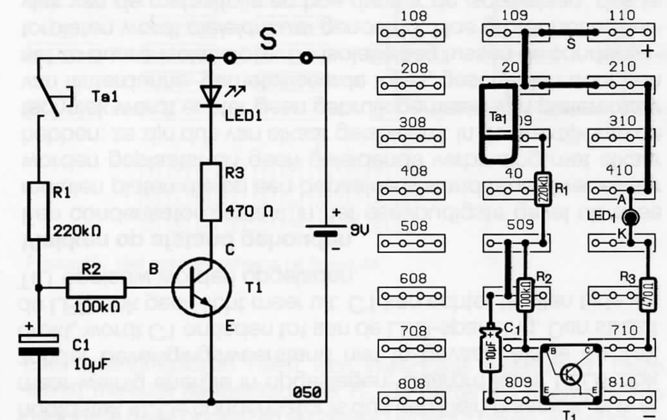
Insider-info 7
Het produkt van *R* en *C* van een schakeling voor het op- en ontladen van een condensator wordt *tijdconstante* genoemd. Het symbool daarvoor is de Griekse kleine letter tau (τ). Tijdens het opladen wordt het spanningsverschil tussen de batterij en de condensator steeds kleiner. Deze spanning staat over *R* en leidt dus volgens Ohm tot een steeds kleiner wordende stroom. Andersom wordt bij het ontladen de condensatorspanning steeds zwakker. Deze spanning staat over de ontladingsweerstand. Dus ook in dit geval wordt de stroom steeds zwakker. De laad- en ontlaadspanning aan de condensator verloopt dus volgens een exponentiële functie. Na verloop van de tijd τ is *C* opgeladen tot 63,2% van de beschikbare spanning. Tijdens het ontladen daalt de condensatorspanning in dezelfde tijd tot 36,8% van de beginwaarde. Tijd-elementen bestaande uit *R* en *C* vormen belangrijke basisschakelingen van de elektronika.

Vlakken gekoppeld

Ook condensatoren kun je combineren. Bij *parallelschakelingen* wordt de beschikbare oppervlakte en dus ook de capaciteit groter. Je telt ze gewoon op: $C_{tot} = C_1 + C_2 + ...$ Een parallelschakeling van 10 µF en 100 µF levert dus C_{tot} = 110 µF op.
Bij de *serieschakeling* ligt de zaak anders: de schakeling wordt weliswaar in z'n geheel opgeladen tot de beschikbare spanning, maar de condensatoren moeten het totaal onder elkaar verdelen. Het resultaat: $1/C_{tot} = 1/C_1 + 1/C_2 + ...$ Een serieschakeling van 100 µF en 470 µF levert dus nog maar ongeveer 82 µF op.

Tijdmultiplicator

Wie, net als wij met onze experimenteerdoos, over de juiste middelen beschikt, kan de zaken groter aanpakken. Daarvoor nemen we nu - net als bij de geestenbezwering - een (nog) onbekend onderdeel ter hand.



Figuur 50. Werkverdeling: hoge weerstandswaarden leiden tot grote vertragingen, dankzij de transistor ook dan een helder licht.

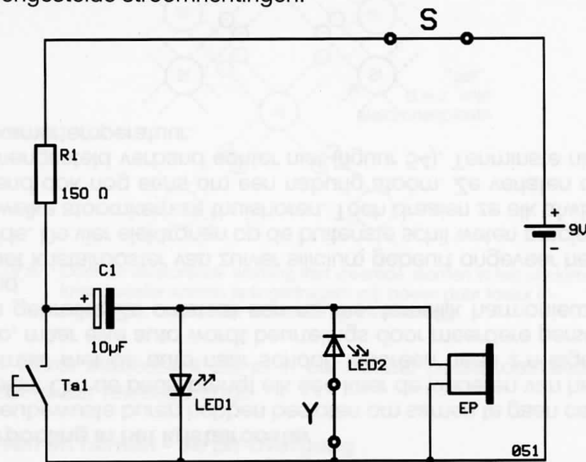
33 In plaats van de licht-emitterende diode plaatsen we de basis-emitterovergang van een transistor in de ontladingskring van de condensator. Bovendien gebruiken we veel hogere weerstandswaarden (figuur 50).

De stroom die naar de transistor vloeit wordt daarin een paar honderd keer versterkt (later vertellen we meer over de functie van transistoren). Hij hoeft dan ook niet groot te zijn om de licht-emitterende diode een net zo helder licht te laten geven als daarnet. De diode bevindt zich in de collector-emitterkring, dus daar waar de versterkte stroom vloeit.
We hebben gezien dat de condensatorlading bij zwakke stromen veel langer meegaat dan bij sterke. Daarom straalt LED1 in ons experiment pas ongeveer 3 seconden na het inschakelen op volle sterkte licht uit. Na het uitschakelen neemt de lichtintensiteit pas na een aantal seconden duidelijk af.

Wisselende verhoudingen

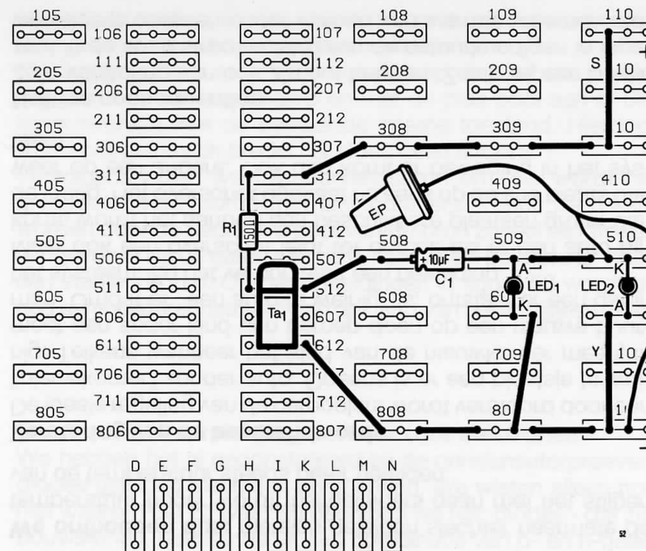
Tot nog toe was het simpel - de stroom vloeit in de richting die de polariteit van de batterij aangeeft. Gelijkstroom dus. Dat er in de stopcontacten van ons lichtnet wisselspanning heerst, weet vast iedereen. Wisselspanning kun je transformeren, dus met een gering verlies op elke gewenste spanningswaarde instellen.

34 We bouwen het experiment op zoals aangegeven in figuur 51. We gebruiken weer een nieuw onderdeel - de oortelefoon. Daarmee kun je naar de stroom "luisteren". De beide licht-emitterende diodes dienen om aan te geven, welke kant het opgaat. Zij zijn antiparallel geschakeld, dus voor tegengestelde stroomrichtingen.



Figuur 51. "Hulpbatterij"-condensator met eigen richting (polariteit) - door een druk op de toets naar wisselstroom.

Diodes, dus ook LEDs, zijn net straten met eenrichtingsverkeer. De pijl geeft de (technische) stroomrichting aan. Het verkeer (de stroom) kan pas in beide richtingen gaan als er naast de straat met eenrichtingsverkeer een tweede is aangelegd voor de tegenovergestelde richting. Daar hebben wij met de tweede LED voor gezorgd.

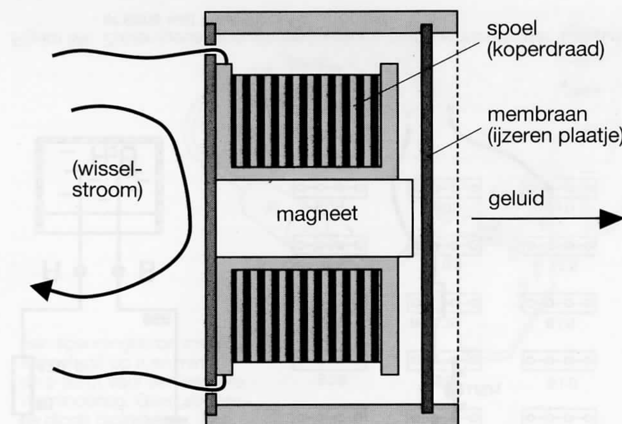


Figuur 52. Het opbouwschema bij figuur 51.

We drukken nu op Ta1, maar slechts even. Anders raakt *R*1 oververhit en wordt de batterij onnodig belast. Je kunt beter een paar keer even op de toets drukken.
We merken op: druk op de toets - LED2 licht even op - laat de toets los - LED1 licht even op. Dat kun je zo vaak herhalen als je wilt. De eerste keer blijft LED2 soms nog donker. In de oortelefoon hoor je iedere keer een knak - nu heb je tegelijkertijd beeld èn geluid.

Insider-info 8
Een oortelefoon is een elektromagnetisch-akoestische omzetter. Hij maakt gebruik van de wisselwerking tussen geleiders waar stroom doorheen vloeit en magnetisch veld. Als er door een elektrische geleider stroom vloeit, ontstaat eromheen een cirkelvormig-concentrisch magnetisch veld. De stroomrichting bepaalt de positie van de noord- en zuidpool. In onze oortelefoon is een dergelijke spoel bevestigd op een permanente magneet.
De spoel maakt het magnetisch veld sterker of zwakker, al naargelang de stroomrichting. Vóór de magneet bevindt zich een dun plaatje van ijzer dat hierdoor meer of minder sterk wordt aangetrokken. Door deze beweging wordt ook de lucht in beweging gebracht, en dat horen we.

De beide licht-emitterende diodes met tegengestelde polariteit knipperen dus om de beurt. Dat betekent dat er uit *C*1 een stroom komt die van richting verandert - inderdaad, een *wis*



Figuur 53. Koper en ijzer: stroom wordt hoorbaar.

selstroom. Dit ondanks het feit dat de batterij alleen maar gelijkstroom levert. Die dient echter slechts als laadstroom voor *C*1. Hij vloeit een poosje nadat we Ta1 hebben losgelaten. Door een druk op de toets verandert de condensator in een batterij die snel zijn lading verliest. Door middel van Ta1 verbinden we de plus-pool van de batterij met de gemeenschappelijke min-draad. De ontlaadstroom vloeit daarom precies in tegengestelde richting - dus door LED2. Voor de oortelefoon maakt het niet uit in welke richting de stroom vloeit. Hij krijgt in beide gevallen zijn deel van de lading, want over de licht-emitterende diodes staat nog steeds een spanning van ongeveer 2 V. Weliswaar ontbreekt er bij LED2 een beveiligingsweerstand, maar die is niet absoluut noodzakelijk, omdat de condensator van 10 µF slechts een kleine hoeveelheid energie afgeeft.

35 Tip voor meer licht: voor *C*1 100 µF i.p.v. 10 µF en (i.p.v. de brug Y) 33 Ω vóór LED2; *R*1 kan worden verhoogd tot 470 µF. "Superlicht" wordt het als je 470 µF en nog eens 150 Ω gebruikt voor *R*1. Vergeet de beveiligingsweerstand voor LED2 niet!
Het principe van het veranderen van de lading van een condensator wordt in de praktijk ook toegepast voor spanningsvariaties (het maken van verschillende spanningen). Alleen wordt dan gebruik gemaakt van een halfgeleiderschakelaar in plaats van een toets. En natuurlijk van automatische omschakeling.

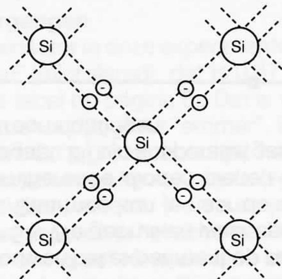
7. Geleider en halfgeleider

We kennen goede elektrische geleiders en maken daar nuttig gebruik van - in de eerste plaats natuurlijk koper. Net zo belangrijk zijn niet-geleiders. Als je die niet had, zou je helemaal geen doelmatig gebruik kunnen maken van elektrische

stroom. Isolatiemateriaal zorgt ervoor dat de stroom in de juiste banen wordt geleid.
Maar de natuur houdt van overgangen, tussenvormen. Tot die tussenvormen behoren de materialen die voor de micro-elektronika onontbeerlijk zijn - de halfgeleiders. Silicium is vandaag de dag waarschijnlijk de belangrijkste halfgeleider. Het wordt in elke gewenste hoeveelheid gewonnen uit gewoon zand. In z'n zuiverste vorm en bij kamertemperatuur heeft het in eerste instantie de eigenschappen van een niet-geleider.

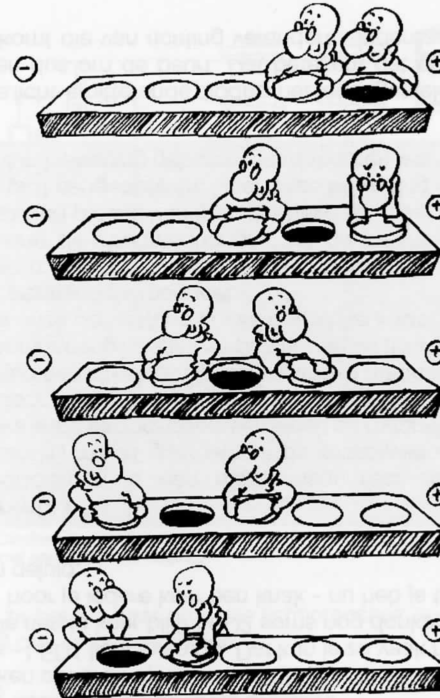
Carpooling in het kristalrooster

Milieubewuste buren hebben besloten om samen te gaan carpoolen. Om de beurt brengt elk één keer de kinderen van hen allemaal met de auto naar school. Iedereen heeft z'n eigen auto, maar elke auto wordt beurtelings door meerdere personen gebruikt. Zo ontstaat een nauwe, tamelijk harmonieuze band.
In het kristalrooster van zuiver silicium gebeurt ongeveer hetzelfde. De vier elektronen op de buitenste schil weten precies, bij welke atoomkern ze thuishoren. Toch draaien ze elk afwisselend ook nog eens om een naburig atoom. Ze verlaten dit samengesteld verband echter niet (figuur 54). Tenminste niet bij kamertemperatuur.



Figuur 54. Verbindingen van elektronenparen bij silicium: elk atoom is verbonden met vier naburige atomen.

Toevoer van warmte heeft echter een opmerkelijke reactie tot gevolg: door een hogere temperatuur kunnen enkele elektronen ondanks hun gevestigde positie in paniek raken. Ze treden buiten hun verband waardoor er gaten ontstaan. Een op het kristal aangelegde spanning zet de elektronen geordend in beweging - als stroom in de richting van de positieve pool. Hoe hoger de temperatuur, des te groter wordt hun aantal. Precies andersom als bij metalen, waar de elektronen het steeds moeilijker krijgen om te bewegen naarmate de temperatuur stijgt: het geleidingsvermogen neemt af. Bij halfgeleiders neemt het geleidingsvermogen dus toe met het stijgen van de temperatuur.
Zodra een gat wordt opgevuld door een elektron uit de buurt, veroorzaakt dit weer een nieuw gat. Wanneer een spanning wordt aangelegd, schuift het gat dus op in de richting van de negatieve pool. Zonder spanning is er echter helemaal geen beweging! De kleine rakkers van figuur 55 laten zien hoe het in z'n werk gaat. Door het verplaatsen van de "schijfjes" naar rechts schuift het gat dat daardoor ontstaat, op naar links.



Figuur 55. Gaten schuiven (ogenschijnlijk) op naar links, omdat ze ontstaan doordat schijfjes (daadwerkelijk) naar rechts worden verplaatst.

We onthouden dus: metalen geleiden slechter naarmate de temperatuur hoger wordt; halfgeleiders gaan met het stijgen van de temperatuur steeds beter geleiden.

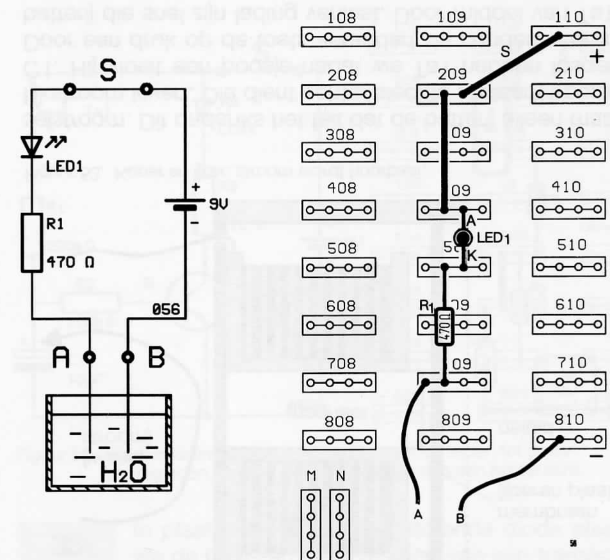
Verstoring van de bestaande orde

De ideale regeling van de carpoolers wordt verstoord door een "nieuwkomer" zonder auto. Opeens is er een plaatsje te weinig. Telkens wanneer het kind van de nieuwkomer meerijdt, moet een ander kind een beroep doen op een nieuwe buurman. Omdat er "een auto te weinig" is, ontstaat er een gat in het systeem. En dat veroorzaakt een beweging.
Maar ook een overschot leidt tot onrust: als er een auto bijkomt, wordt het aanbod aan beschikbare plaatsen groter dan de vraag. Het overschot ontstaat nu eens op de ene plaats dan weer op een andere. Ook dan komt er beweging in het systeem.

Nuttige consequenties

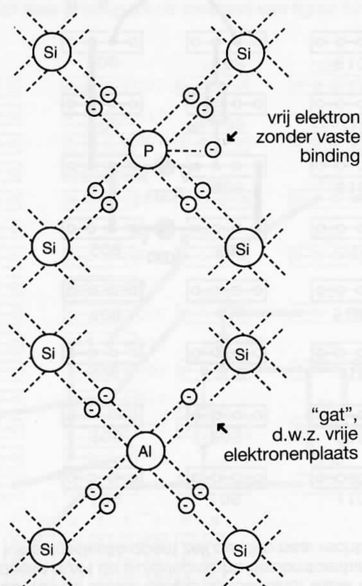
Zo'n verstoring kan ook z'n nut hebben. Zoals wij een beetje zout in de soep strooien, strooien de natuurkundigen in ingewikkelde processen onder invloed van warmte vreemde atomen in het zuivere silicium. Ze noemen dat *doteren*. Deze vreemdelingen zijn niet vierwaardig, maar drie- of vijfwaardig. Driewaardige veroorzaken een "gat", een vrije elektronenplaats. Vijfwaardigen daarentegen maken een elektron vrij dat niemand in de buurt kan gebruiken. Dat betekent dat zowel elektronen als gaten noodgedwongen er op uit moeten trekken.
Een materiaal met dergelijke "gebreken" kan zelfs bij normale, "menselijke" temperaturen stroom geleiden, als er spanning wordt aangelegd - ook al geleidt het minder goed dan bijvoorbeeld koper. De vrije elektronen slingeren zich als het ware aan een touw bungelend door het rooster naar de plus-pool van de batterij, de gaten worden aangetrokken door de min-pool, waar voldoende elektronen zitten. Want een gat betekent een tekort aan elektronen. Als zo'n gat op trektocht gaat is er dus in werkelijkheid sprake van elektronen die deze gaten opvullen. Onderweg laten ze echter weer gaten vallen op die plaatsen waar ze vandaan komen. Hoe dat in z'n werk gaat, hebben ons de rakkers in figuur 55 al laten zien.

36 We vullen een klein, schoon bakje met gedemineraliseerd water. (Een beetje gesmolten ijs van de wand van de diepvrieskist is ook goed.) Dan hangen we de blanke uiteinden van twee draden zo in het water dat deze elkaar niet raken. We verbinden de beide draden met een proefschakeling zoals aangegeven in figuur 56. We houden de licht-emitterende diode in het oog. Deze blijft in eerste instan-



Figuur 56. Zuiver (gedemineraliseerd) water is een slechte geleider. Laten we er eens wat keukenzout in strooien!

tie donker. Gedemineraliseerd (of gecondenseerd) water is een slechte geleider.
Nu helpen we een handje door een paar korreltjes keukenzout in het water te strooien en stellen vast: de LED geeft licht! Onze conclusie luidt: als je het water met keukenzout "doteert", wordt het geleidingsvermogen ervan aanzienlijk verbeterd. Dit vindt zijn oorzaak weliswaar niet in ver: deringen van het rooster, maar als illustratie werkt deze proef heel verhelderend. Maar laten we terugkeren naar het silicium. We noemen het materiaal p-geleidend wanneer de gaten de overhand hebben, en n-geleidend wanneer de dotering tot een overschot aan elektronen leidt. Zie figuur 57.



Figuur 57. Door de verstorende werking van vreemde atomen in het silicium-kristalrooster komen ladingsdragers vrij: boven door fosfor (n-overschot), onder door aluminium (p-overschot).

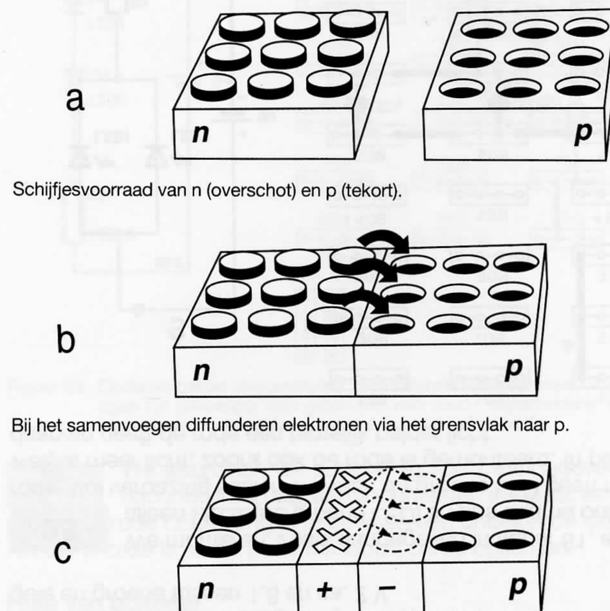
Het wordt interessant als je in één kristal beide toestanden naast elkaar teweegbrengt.

Geven en nemen - de pn-overgang

Het hoeft niet altijd tot een confrontatie te komen, als tegenstellingen elkaar ontmoeten. Integendeel. Tussen een p- en een n-geleidende zone ligt een interessant gebied: een pn-overgang. Dat is een soort vrijhandelszone. Zolang er van buitenaf geen druk wordt uitgeoefend, d.w.z. spanning wordt aangelegd. Enkele overtollige elektronen uit de n-zone vestigen zich aan de p-kant. Anders gezegd: ze diffunderen ernaar toe. Dat betekent voor het grensgebied een positieve lading aan de n-kant en een negatieve lading aan de p-kant. Aan de buitenkant merk je er niets van. In totaal wordt het aantal vrije ladingdragers in de overgangszone kleiner.
Nu leggen we een spanningsbron aan op de p- en de n-kant. Eerst met de min-pool aan p en met de plus-pool aan n. Dat komt overeen met de bestaande interne toestand. Hierdoor wordt het grensvlak breder. Er vloeit geen stroom.
Vervolgens polen we de spanningsbron om. Nu wordt het grensvlak overstroomd met ladingdragers. Vanuit de n-kant worden door de negatieve pool van de bron zoveel elektronen aangevoerd als de gaten aan de p-kant willen hebben. Er vloeit een sterke stroom. Op de afbeeldingen in figuur 58 wordt dit nog eens gedemonstreerd aan de hand van het schijfjesmodel.

De straat met eenrichtingsverkeer voor elektronen

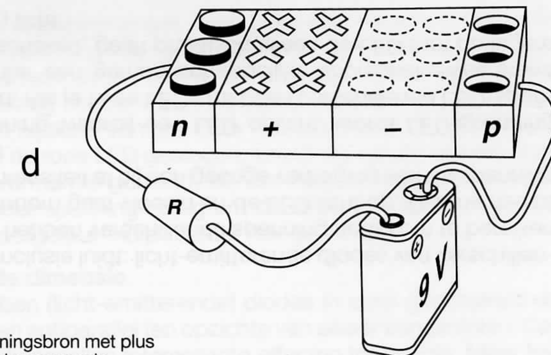
We hebben het al geconstateerd bij de condensatorproeven: diodes geleiden slechts in één richting. We wisten alleen nog niet waarom dat zo was. Nu begrijpen we het: diodes - dat zijn bouwstenen, bestaande uit een combinatie van p- en n-geleidende materialen. Ze geleiden alleen wanneer een spanningsbron met de plus-pool op de p-kant en met de min-pool op de n-kant wordt aangesloten. Bij een omgekeerde polariteit ontstaat er geen beweging. Dat is precies het probleem waarmee het ventje in figuur 59 wordt geconfronteerd: het water duwt tegen de afsluitklep en verspert op die manier voor zichzelf de doorgang. Als je het daarentegen aan de andere kant naar binnen laat lopen, drukt het de klep open en kan het ongehinderd doorstromen.



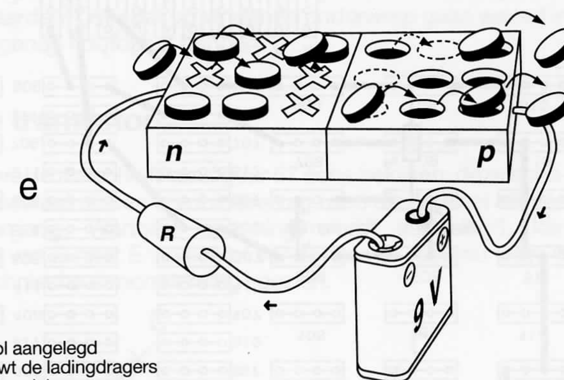
Schijfjesvoorraad van n (overschot) en p (tekort).

Bij het samenvoegen diffunderen elektronen via het grensvlak naar p.

Bij n ontbreken er nu elektronen, bij p zijn gaten opgevuld - het aantal vrije ladingdragers op het grensvlak is kleiner geworden.



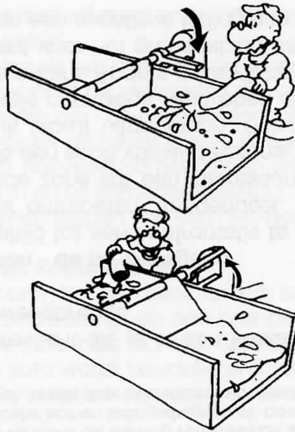
Een spanningsbron met plus aangelegd op n en min op p zorgt voor een verdere vermindering. Geen stroom - de diode blokkeert.



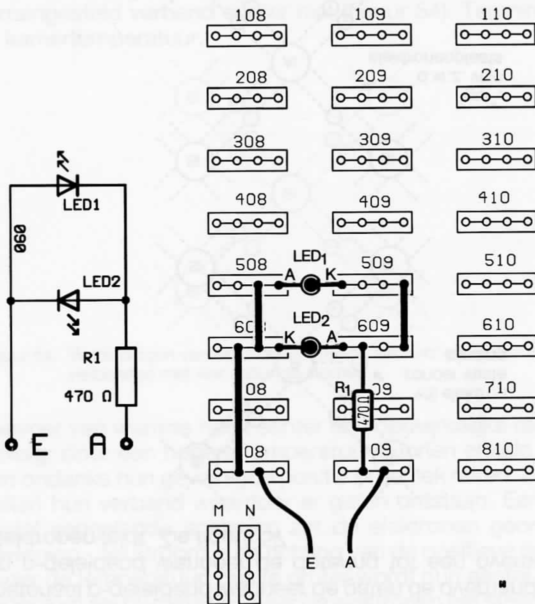
Min-pool aangelegd op n duwt de ladingdragers naar het n-vlak, plus-pool op p zuigt ze weg. Er vloeit stroom - de diode geleidt.

Figuur 58. Schijfjesmodel van een diode van n- en p-materiaal - de situatie hangt af van de van buitenaf aangelegde spanning.

37 Met behulp van twee licht-emitterende diodes en een weerstand bouwen we de pooltester op zoals aangegeven in figuur 60. Nu wordt voor elke batterij aangegeven aan welke kant zich de plus-pool bevindt: ligt de plus bij E, dan geeft LED1 licht, ligt de plus bij A, dan straalt LED2 licht uit.



Figuur 59. Watermodel van de diode. Gesperde toestand: water in het rechter kanaalgedeelte duwt de sluisklep dicht. Stroomtoestand: water in het linker kanaalgedeelte opent zelf de klep naar rechts.

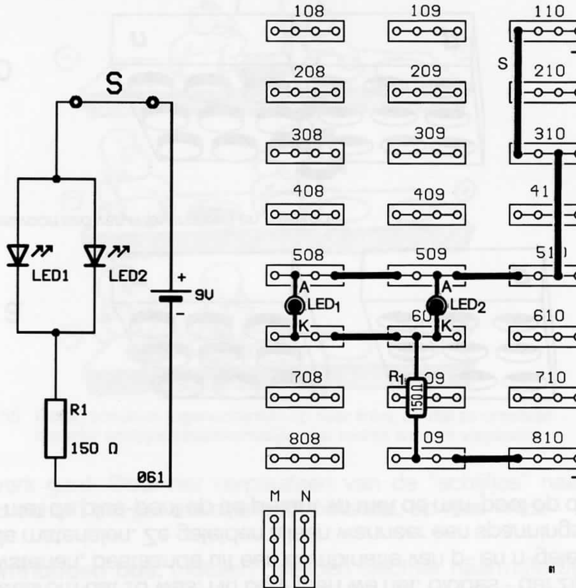


Figuur 60. Polariteitsdetective: plus bij E zorgt ervoor dat LED1 oplicht; ligt de plus-pool bij A dan geeft LED2 licht.

Bonte verscheidenheid

Dat er allerlei soorten licht-emitterende diodes bestaan, kun je al zien aan de kleuren. Die hebben betrekking op het gebruikte materiaal (groen en geel bij gallium-arsenide, rood bij gallium-arsenide-fosfide). Hoeveel spanning er nodig is om de stroom te laten vloeien, is ook afhankelijk van het materiaal. Immers, alles moet betaald worden. Rode licht-emitterende diodes hebben - al naar gelang het type - 1,5 à 1,7 V nodig, gele en groene tussen 1,8 en ca. 2 V.

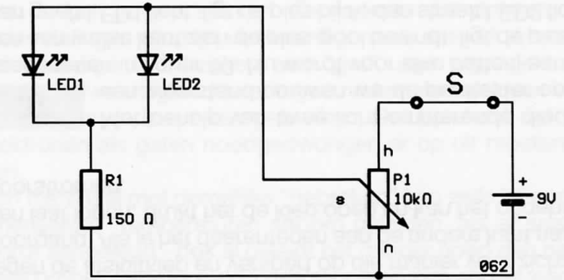
38 We monteren, zoals aangegeven in figuur 61, eerst alleen LED2 (de groene LED) en pas daarna ook de rode. Vol verbazing stellen we vast: de groene LED geeft nauwelijks meer licht, zodra ook de rode is gemonteerd. In plaats daarvan geeft de rode een tamelijk helder licht.



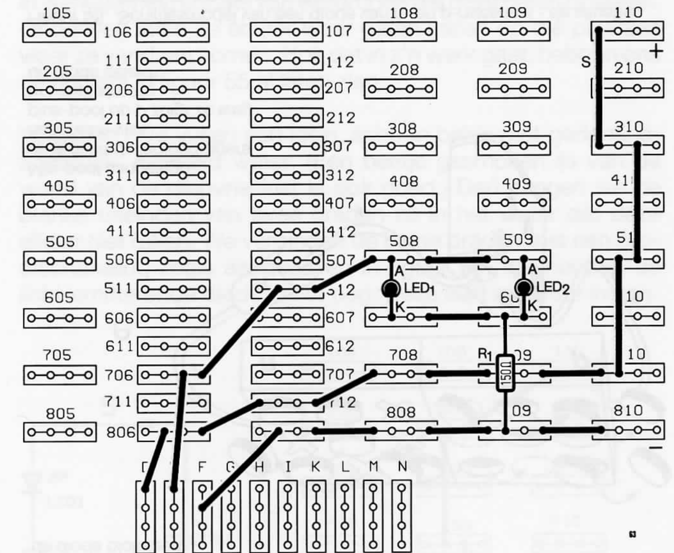
Figuur 61. Rood vóór groen: als je de rode LED parallel schakelt aan de groene wanneer die licht geeft, wordt de lichtintensiteit van de groene minder.

39 We breiden de schakeling van figuur 61 uit met een potmeter (figuur 62). We draaien de potmeter vanuit de onderste aanslag langzaam op. We zien: de rode LED begint al direct na het opdraaien licht te geven, de groene (zwak) pas vlak voor de bovenste aanslag.

40 We voorzien elke LED van een aparte voorschakelweerstand (figuur 64) en herhalen de proef. We stellen vast: omdat elke LED een eigen voorschakelweerstand heeft, gaat ook die welke de meeste spanning nodig heeft, tenslotte helder licht geven. Terwijl de rode LED bij ongeveer 1/3 van het bereik van de draaiknop oplicht, volgt de groene pas bij ongeveer 2/3. Ter vergelijking schakelen we de beide LEDs weer parallel (druk op Ta1): de groene "geeft zich over" aan de rode.

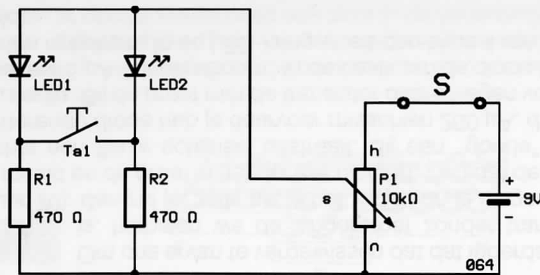


Figuur 62. Het effect van figuur 61 met "vertraagde" spanningstoevoer: als je P1 langzaam opdraait, licht eerst de rode LED op; pas als je de knop verder opdraait, volgt de groene LED.

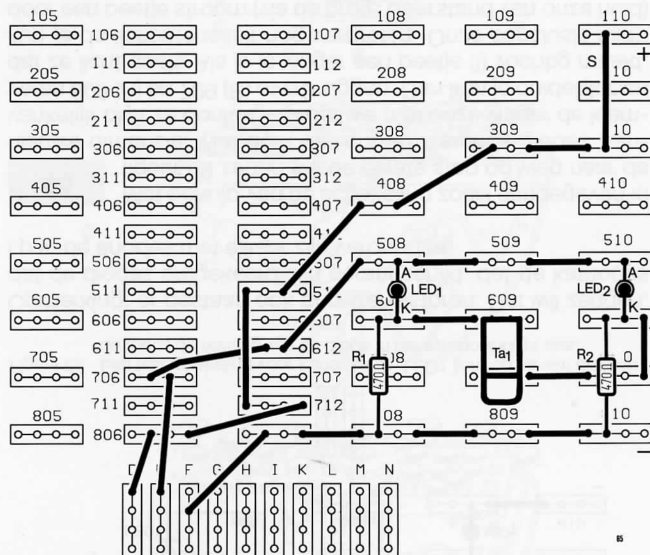


Figuur 63. Het opbouwschema bij figuur 62.

Onze conclusie luidt: licht-emitterende diodes van verschillende kleur hebben verschillende spanning nodig om te bereiken dat de stroom gaat vloeien en de LED licht op. Daarna neemt de lichtintensiteit al bij een geringe verhoging van de spanning sterk toe.
De spanning waarbij een LED oplicht, wordt *LED-spanning* genoemd. Als je twee LEDs met een verschillende LED-spanning achter een gemeenschappelijke voorschakelweerstand parallel schakelt, geeft praktisch alleen de LED met de lagere spanning licht.



Figuur 64. Afzonderlijk oprukken (van stromen), samen branden! Door een druk op Ta1 keer je terug tot de toestand van figuur 62.



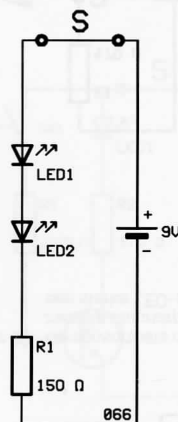
Figuur 65. Het opbouwschema bij figuur 64.

Insider-info 9

Maar nu ter zake. De natuurkundigen hebben modellen ontwikkeld voor halfgeleider-bouwelementen, volgens het principe dat de stroom bij de pn-overgang op gang komt, zodra de ladingdragers van buitenaf voldoende energie hebben gekregen. Daardoor worden ze vanuit stilstand op een "band" getild, waarop ze zich vrij kunnen bewegen. De afstand tussen de stilstand en deze band komt overeen met de drempelspanning. Wanneer deze spanning is bereikt, kunnen heel veel ladingdragers hun bijdrage gaan leveren aan het vloeien van de stroom. Een klein beetje extra spanning volstaat om ze nagenoeg allemaal in beweging te zetten: de *verzadigingsspanning*. Daarbij ontstaat echter al zoveel vermogen dat het bouwelement (dus de licht-emitterende diode bijvoorbeeld) stuk gaat. En dat bij een spanning die niet veel meer bedraagt dan de drempelwaarde. Dat verklaart waarom we een voorschakelweerstand moeten gebruiken.

Niet alleen spanning, maar ook warmte-energie is geschikt om de elektronen in beweging te zetten. Vandaar dat de waarde van de drempelspanning lager wordt naarmate de temperatuur stijgt.

41 We schakelen een rode en een groene licht-emitterende diode in serie en vergelijken de lichtintensiteit (figuur 66). Nu vloeit er door beide diodes dezelfde stroom. Toch is het niet noodzakelijk dat ze allebei even helder licht geven. Alle types en exemplaren verschillen onderling. Daar komt nog bij dat onze ogen minder gevoelig zijn voor rood licht dan voor geel of groen licht.



Figuur 66. Ondanks gelijke stroomsterkte verschillende lichtintensiteit: onze ogen zijn gevoeliger voor groen dan voor rood, "superheldere" rode licht-emitterende diodes compenseren dat indien nodig.

42 We gebruiken de schakeling zoals aangegeven in figuur 66 voortaan als diodentester: in plaats van de groene of rode LED monteer je gewoon een onbekende diode. Als die in orde is en de polariteit klopt, zal ze oplichten.

Hulp van buitenaf

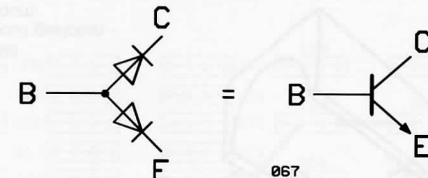
De drempelspanning voor een bepaalde stroom is geen onwrikbare waarde. Verderop, in het hoofdstukje over de transformator, kunnen we dat op doeltreffende wijze demonstreren. We beperken ons hier tot een theoretische proef: in de parallelschakeling van figuur 61 koelen we de rode LED met ijs en verwarmen de groene voorzichtig (bijv. met een föhn). Dit zal tot gevolg hebben dat de rode LED zwakker en de groene helderder oplicht. Immers: door het afkoelen is de LED-spanning van de rode LED gestegen, terwijl die van de groene door het verwarmen is gedaald. Bij een hogere temperatuur is er dus minder spanning nodig om de LEDs licht te laten geven. Vaak is dergelijke "hulp" echter niet gewenst.

De derde dimensie

We hebben (licht-emitterende) diodes in serie geschakeld en parallel en antiparallel ten opzichte van elkaar aangesloten. Dat had in alle gevallen interessante effecten tot gevolg. Maar het aanééenschakelen van twee diodes overtreft alles. Al moet dat dan wel op één en dezelfde kristal gebeuren: pn in serie met np. Of np in serie met pn. En dan nog alleen onder bepaalde voorwaarden. Over dat opwindende onderwerp gaan we het in het volgende hoofdstuk hebben.

8. De transistor

Laten we de linker helft van figuur 67 eens bekijken: deze schakeling bestaat uit een combinatie van twee diodes met elk één pn-overgang. Wanneer spanning wordt aangelegd, kan stroom van B naar E vloeien of van B naar C - ook nu weer in de "technische stroomrichting" gezien.

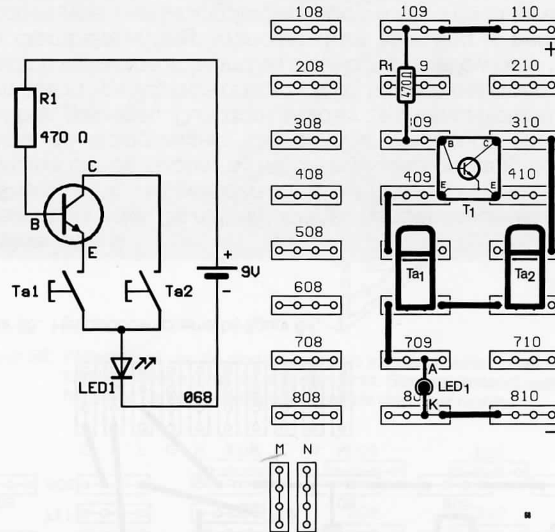


Figuur 67. De npn-transistor: op het eerste gezicht "gewoon" een combinatie van twee diodes (links). Maar het schakelsymbool (naar keuze met een cirkeltje) doet vermoeden dat er iets bijzonders aan de hand is (rechts).

De keuze voor de letters E, B en C is niet toevallig. De beide diodes bevinden zich namelijk op hetzelfde siliciumkristal. De p-zone, die tamelijk klein is, hebben ze gemeenschappelijk. Deze zone wordt de basis genoemd. De onderste aansluiting heet emitter, de bovenste collector. Het geheel vormt een *transistor*. Deze namen hebben een "historische" achtergrond. Zo'n npn-rangschikking levert verbazingwekkende prestaties. De diodes vormen slechts een deel van de nieuwe waarheid. Vandaar ook het nieuwe schakelsymbool rechts in figuur 67.

43 We bouwen de testschakeling op zoals aangegeven in figuur 68 en testen daarmee de beide npn-

transistoren uit onze experimenteerdoos. Zodoende bevestigen we wat in figuur 67 was aangegeven: tussen B en E zit werkelijk een diode en eveneens tussen B en C.

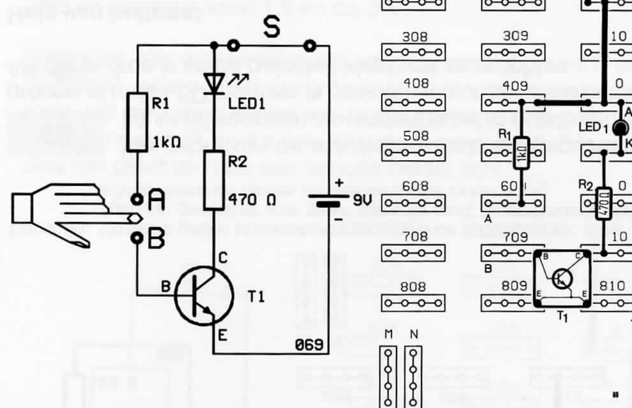


Figuur 68. Een testschakeling voor transistoren: LED1 licht op na een druk op de toets; de richting van de diode in het symbool klopt dus.

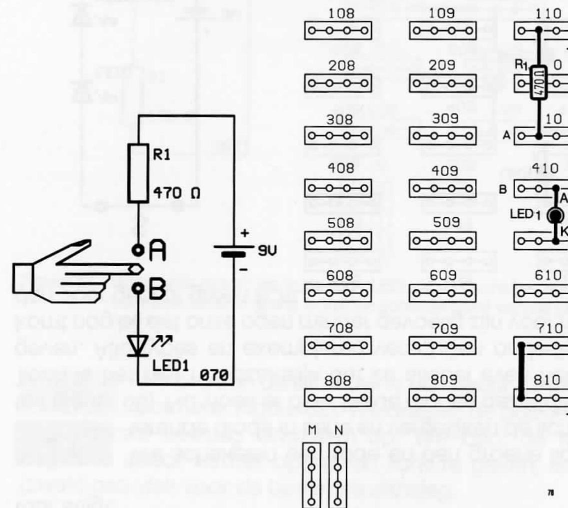
Opmerking: er bestaan ook pnp-transistoren. Dat wil zeggen, dat de diodes omgekeerd zijn gerangschikt, dat de kathodes i.p.v. de anodes met elkaar zijn verbonden.

44 Met behulp van de schakeling zoals aangegeven in figuur 69 zetten we de eerste stap op weg naar de nieuwe dimensie. Wat doet de licht-emitterende diode? Aanvankelijk blijft ze donker - totdat we met onze vinger de klemveren 609 (A) en 709 (B) overbruggen. Dan kun je duidelijk zien dat ze licht geeft. Als je je vinger een beetje (!) vochtig maakt, kun je de lichtintensiteit nog vergroten. Onze conclusie luidt: door een beetje stroom (via de grote weerstand van onze huid) naar de basisaansluiting te leiden hebben we een veel sterkere stroom teweeggebracht. Die vloeit tussen de collector- en de emitteraansluiting.

45 Om ons ervan te vergewissen dat dat inderdaad zo is, herhalen we de vingerproef zonder transistor (figuur 70): dan zul je, zelfs als je het topje van je vinger goed nat maakt en de proef in het donker uitvoert, zien dat de diode slechts een flauw schijnsel uitstraalt. Bij een "goede" lichtemitterende diode heb je daarvoor misschien 200 µA, dus 0,2 mA, nodig. Bij de proef mét de transistor daarentegen volstaat ongeveer 5 µA "vingerstroom" in de basis om de diode helder te laten oplichten. In de LED-kring vloeit dan bijna 4 mA (voorbeeld).



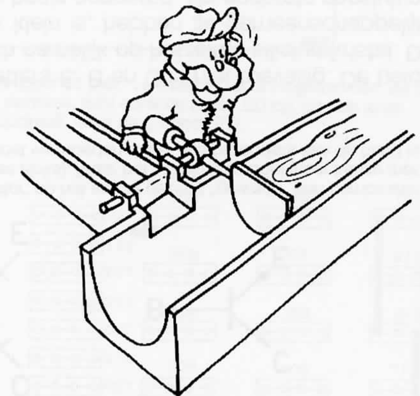
Figuur 69. De sensortoets maakt het versterkingseffect duidelijk: slechts een zwakke stuurstroom via de grote weerstand van de huid en toch een sterke LED-stroom.



Figuur 70. De proef op de som: LED1 gloeit hoogstens een beetje, als je je vinger goed nat maakt. Hier is geen sprake van versterking!

'n Steuntje bij het nadenken

Het feit dat de beide n-zones op het transistorkristal vlak bij elkaar liggen doet wonderen. Een zwakke stroom leidt tot een aanzienlijk sterkere. De zwakke basisstroom vloeit samen met de sterke collectorstroom uit de emitteraansluiting naar buiten. Een vergelijking met het watermodel ligt voor de hand (figuur 71): als je een beetje water in het smalle "basis-zijkanaal" laat lopen, wordt daardoor de sluis geopend voor de grote waterstroom in het hoofdkanaal tussen collector en emitter. Hoe meer water in het basiskanaal, des te verder wordt de stuurklep opengezet - je kunt de collectorstroom doseren zoals je wilt!



Klep in het hoofdcircuit gesloten - geen stroom.

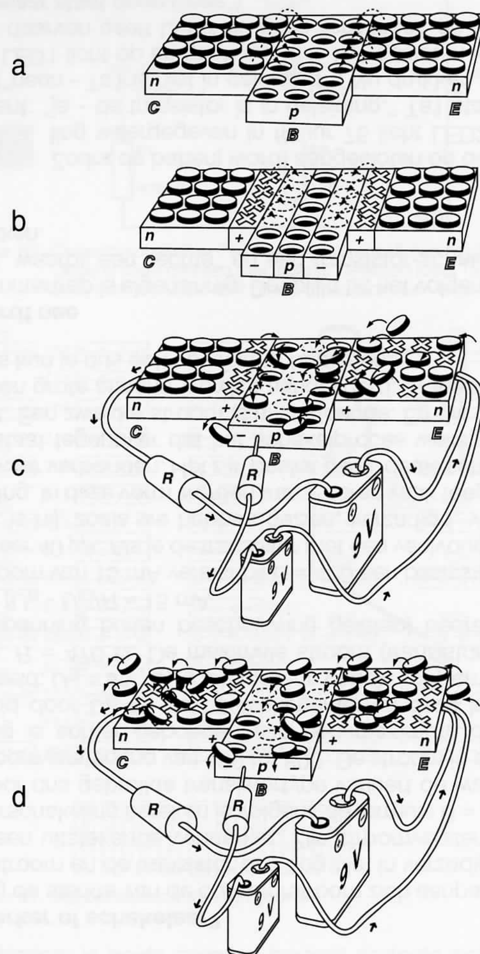


Een beetje water in de stuurkring (basis) en de stuurklep wordt omhooggeduwd. Daardoor wordt de hoofdklep in het brede kanaal geopend - de zwakke basis- en de veel sterkere collectorstroom vloeien.

Figuur 71. De transistor als sluis met stuurmechanisme.

De plaatjes in figuur 72 werken weer met het schijfjesmodel. Zelfs als er geen spanning is aangelegd, leidt de diffusie tot "verarmingszones" in de grensgebieden. De n-grenslagen nemen positieve, de p-grenslagen negatieve lading op. Spanning aan de basis-emitterdiode in doorlaatrichting leidt ertoe dat de verarmingszone in dit gebied smaller wordt. Het gebied wordt met ladingdragers overspoeld. Aangezien de p-laag

heel dun is, dringen elektronen ook door in de verarmingszone van de collectorzijde. Daar heerst positieve spanning. Die brengt een in verhouding tot de basisstroom sterke collectorstroom op gang.



Figuur 72. De transistor als schijfjesmodel.

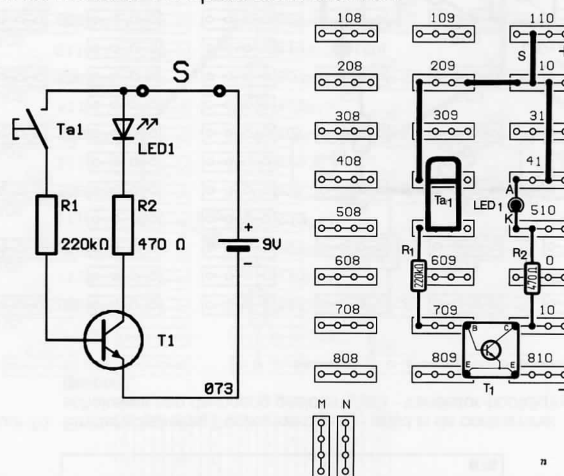
a Schijfjes (elektronen) diffunderen vanuit de beide n-gebieden naar het "gaatjesgeleidende" p-gebied.
b De verarmingszones die zo ontstaan, reiken tot diep in de basis. Resultaat: positieve lading van de n-grenslaag, negatieve lading van de p-grenslaag.
c Tussen basis- en emitteraansluiting wordt een spanning aangelegd, die de daartussen liggende verarmingszone smaller maakt en met ladingdragers overspoelt.
d Aangezien de basislaag heel dun is, dringen er ook elektronen door tot in de collector-verarmingszone. Zodoende zorgt de tussen collector en emitter aangelegde spanning ervoor, dat er een sterke stroom op gang komt.

Emitterschakeling

Het topje van onze vinger is op den duur natuurlijk geen bruikbaar bouwelement. De proef volgens figuur 69 laat echter zien, hoe bepaalde sensoren in apparaten kunnen worden toegepast. Laten we nu de aan wisselingen onderhevige weerstand van onze huid met een waarde van een paar honderd kilo-ohm vervangen door een degelijke vaste weerstand!

46

Zoals aangegeven in figuur 73 monteren we in plaats van het sensortraject een toets en een weerstand in de schakeling. Per slot van rekening is het traject B-E een gevoelige diode die behoefte heeft aan een beveiligingsweerstand. We stellen vast: ondanks de hoge weerstandswaarde straalt de licht-emitterende diode een tamelijk helder licht uit wanneer we op de toets drukken.



Figuur 73. Kleine oorzaak (basisstroom) - grote gevolgen (collectorstroom)!

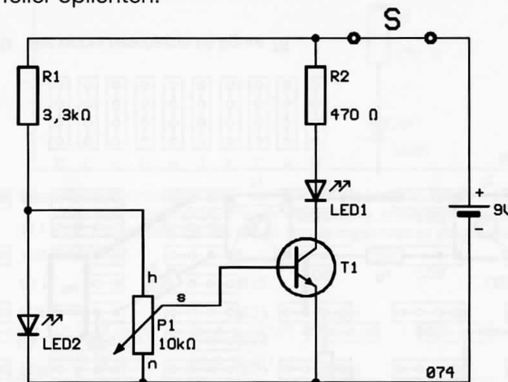
Bij deze proeven zien we altijd twee circuits: de *stuurkring* aan de kant van de basis en de *belastingskring* (waar de werking optreedt) aan de kant van de collector. Gemeenschappelijk element van beide is de emitter, de transistor werkt in *emitterschakeling*. Of, aangezien de "gevolgen" zich voordoen bij de collector, als *collectorvolger*.

Alweer een drempel

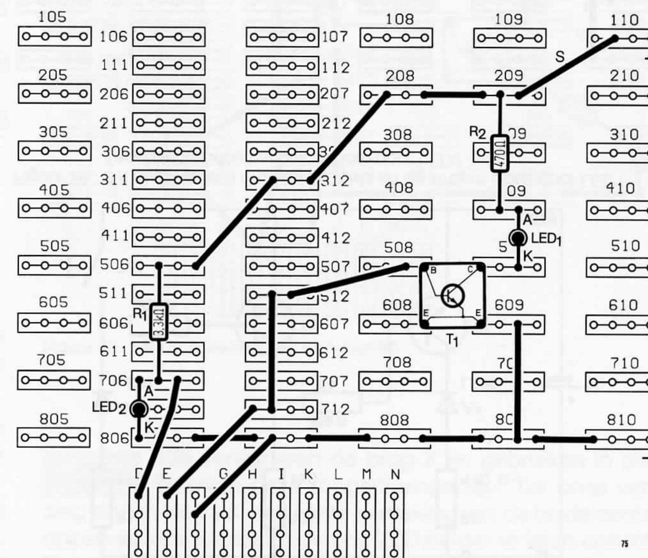
Hoe sterk is in figuur 73 eigenlijk de basisstroom I_B? Ruwweg berekend volgt die uit $I_B = U_B/R1$. (U_B is de batterijspanning). Dat is niet helemaal nauwkeurig, want het traject B-E heeft als diode eveneens een drempelspanning.

47

We bouwen de testschakeling op zoals aangegeven in figuur 74. Door de truc met de groene LED2 verkrijgen we een relatief stabiele spanning van ongeveer 2 V. Maar dat geldt alleen als we de loper van de potmeter niet verder dan voor 3/4 opdraaien. We beginnen bij de onderste aanslag en houden LED1 in het oog. We zien: ongeveer bij 1/3 van het instelbereik begint LED1 (eerst zwak) licht te geven. Nu moet je heel voorzichtig verder draaien, want de diode gaat al gauw feller oplichten.



Figuur 74. Drempeleffect: de basisstroom, en dus ook de collectorstroom, begint bij een bepaalde positie van P1 tamelijk abrupt te vloeien.



Figuur 75. Het opbouwschema bij figuur 74.

Wij leiden hieruit af: de drempelspanning van onze basis-emitterdiode bedraagt iets minder dan 1/3 van de drempelspanning van de (groene) LED2. Met behulp van een voltmeter zou je kunnen vaststellen, dat ze begint op te lichten bij ongeveer 0,55 V. Al vanaf 0,7 V neemt de lichtintensiteit van LED2 nauwelijks nog toe. De transistor heeft dan namelijk zo ongeveer al zijn vrije elektronen op reis gestuurd. We noemen dat *verzadiging*. Onder deze omstandigheden kun je tussen collector en emitter nog maar een kleine spanning in de orde van grootte van millivolts meten. De transistor is nu “in geleiding”.

Versterker of schakelaar?

Zolang de sterkte van de collectorstroom zich aanpast aan de basisstroom en de transistor dus nog niet in verzadiging is, is deze een uitstekende versterker. Zijn *stroomversterking* B in emitterschakeling bereken je volgens de formule $B = I_C/I_B$. Bij het door ons gebruikte transistortype varieert de waarde van de stroomversterking van 400 tot 800. De stroom in de collectorkring is echter gebonden aan een maximum dat wordt bepaald door U_B en de bouwelementen in deze kring. Een voorbeeld: $U_B = 9$ V, $U_F = 2$ V (groene of gele licht-emitterende diode). $R = 470\ \Omega$. De maximale stroom (transistor-verzadigingsspanning buiten beschouwing gelaten) bedraagt dan: $I_{max} = (U_B - U_F)/R \approx 15$ mA.

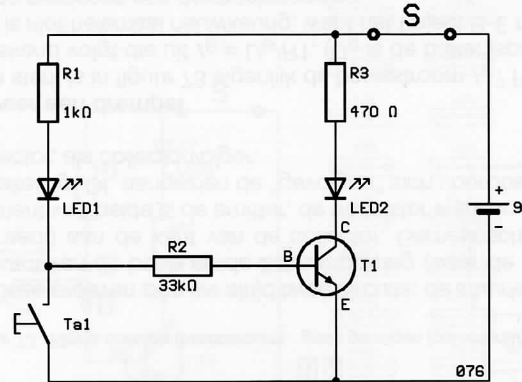
De stroom van 15 mA vereist bij B = 400 een basisstroom van ongeveer 40 µA. Als je de transistor met een veelvoud daarvan voedt, is hij, zoals we hebben gezien, verzadigd, volledig in geleiding. In deze vorm worden transistoren vaak toegepast en met elkaar verbonden. Het zijn beslist geen ideale schakelaars. Daar staat tegenover dat het schakelproces weinig “kracht” vereist. Een zwakke stroom is al voldoende. En die mag zelfs over een grote afstand worden aangevoerd. Transistor-schakelaars kun je dus ook *op afstand bedienen*.

Ja wordt nee

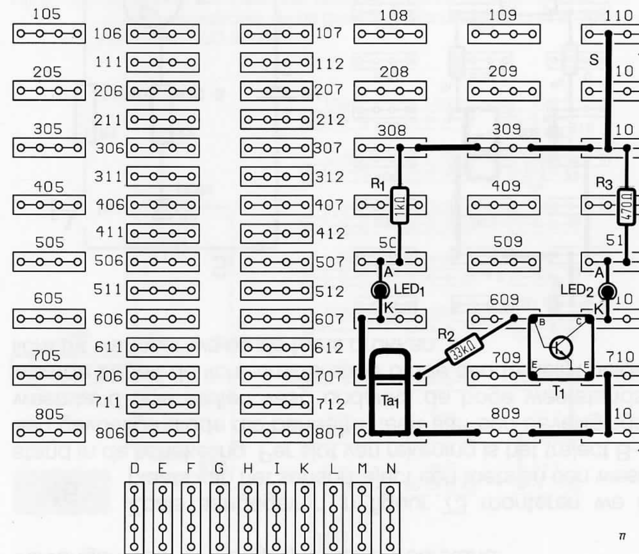
Een emittertrap is eigenzinnig. Dat blijkt uit het volgende experiment, waarbij een “echte” en een transistor-schakelaar zijn betrokken.

48 Zodra de batterij wordt aangesloten op de schakeling weergegeven in figuur 76 licht LED2 op. Dat betekent: “ja - de transistor is in geleiding.” Ta1 staat echter open (“neen - Ta1 is *niet* in geleiding”). Nu drukken we op de toets. LED1 licht op en geeft aan dat Ta1 gesloten is (“ja”). In plaats daarvan geeft LED2 nu geen licht meer: de transistorschakelaar staat open (“nee”).

Onze conclusie luidt: aan de uitgang van een emitterschakeling gebeurt altijd het omgekeerde van dat wat aan de ingang gebeurt. Latinisten hebben daarvoor de naam *invertor* bedacht. Wat gebeurt er nu, wanneer je op de uitgang van zo’n invertor de ingang van een tweede invertor aansluit?

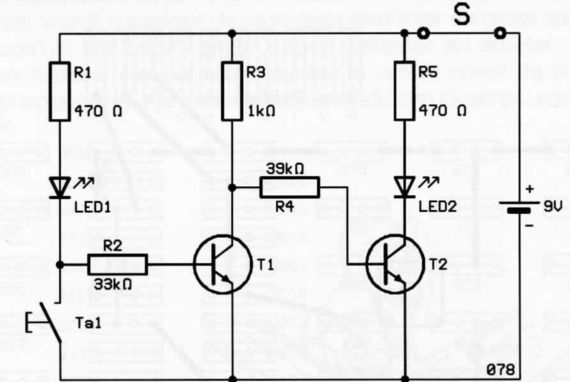


Figuur 76. Emitterschakeling (“collectorvolger”) - altijd in de contramine: schakelaar aan de ingang gesloten (“ja”) - transistor-hoofdkring gesperd.

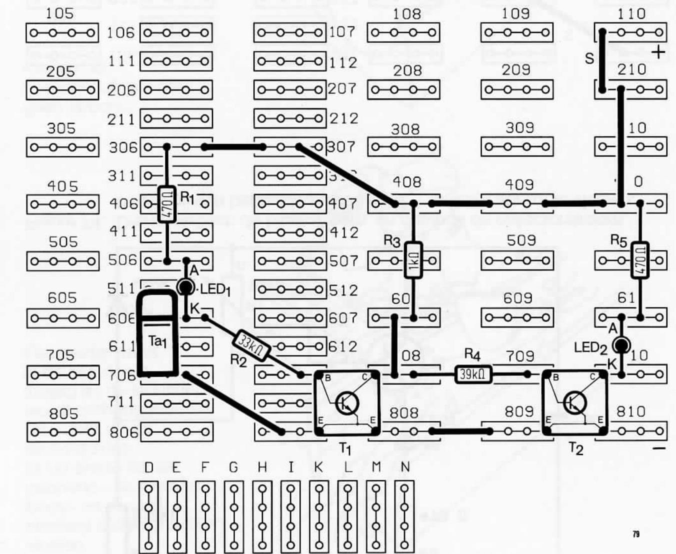


Figuur 77. Het opbouwschema bij figuur 76.

49 We gaan onze invertor veranderen en uitbreiden volgens de aanwijzingen in figuur 78. We stellen vast: LED1 en LED2 blijven donker! Dan drukken we op Ta1 en - de beide licht-emitterende diodes lichten op! Een omslachtige manier om tot uitdrukking te brengen “2 x nee = ja”? In schakelingen die later aan de orde komen zullen we zien, hoe nuttig dit kan zijn.



Figuur 78. 2 x nee = ja: een druk op de toets en de stroom vloeit door LED1. Tegelijkertijd vloeit er ook stroom door LED2.

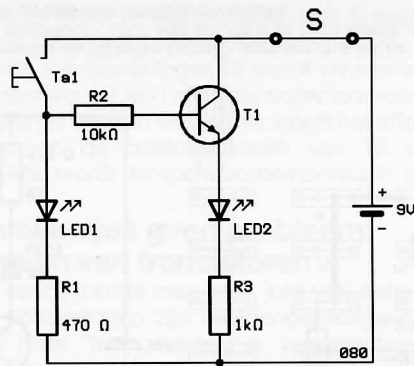


Figuur 79. Het opbouwschema bij figuur 78.

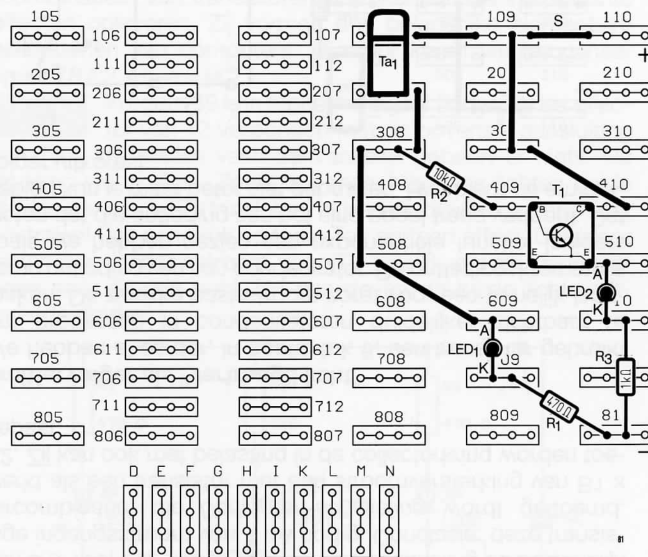
Collectorschakeling

Verhoogd met de zwakke basisstroom komt de collectorstroom aan de emitter weer naar buiten. Dan zullen we onze “last” (LED plus *R*) dus ook wel hierop kunnen aansluiten!

50 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 80 en zien: LED2 blijft donker zolang Ta1 openstaat. Hetzelfde geldt voor LED1. Als we op Ta1 drukken, lichten ze allebei op.



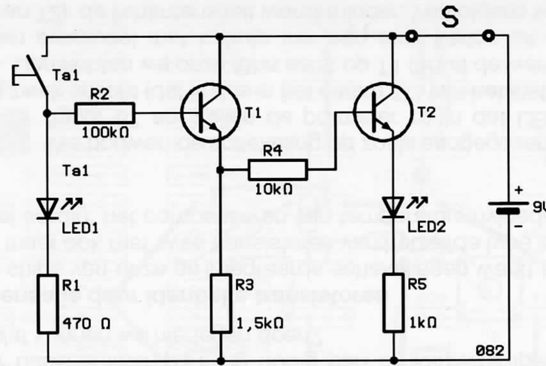
Figuur 80. Collectorschakeling ("emittervolger") - heeft een positieve instelling. Uitgang komt overeen met ingang. Gesloten toets Ta1 (LED1 geeft licht) laat ook LED2 licht geven (transistor doorverbonden).



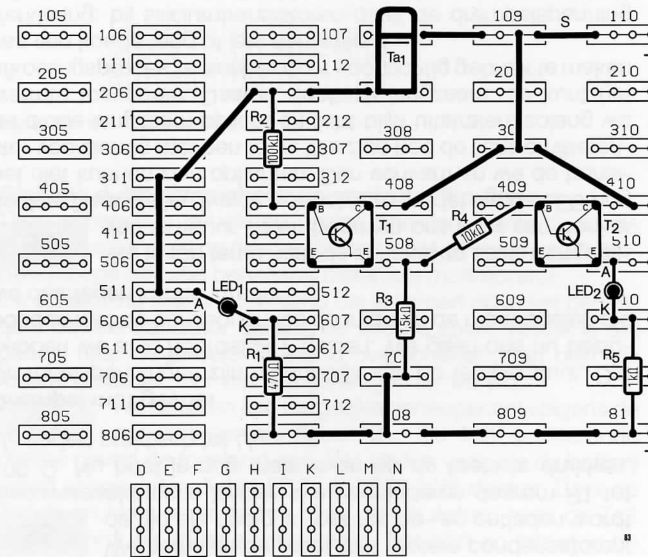
Figuur 81. Het opbouwschema bij figuur 80.

Verklaring: in beide gevallen bevindt de toets zich tussen de basis en de gemeenschappelijke transistoraansluiting voor de in- en uitgangskring. De in figuur 80 weergegeven schakeling, ook wel *emittervolger* genoemd, antwoordt echter op "ja" aan de ingang ook gehoorzaam met "ja" aan de uitgang.

51 Om dit te bevestigen monteren we ook in deze schakeling een tweede emittervolger achter de eerste (figuur 82). Er verandert niets: ja blijft ja. Beide licht-emitterende diodes lichten op wanneer we op de toets Ta1 drukken.



Figuur 82. 2 x ja = ja. Twee emittervolgers achter elkaar houden vast aan de waarheid.

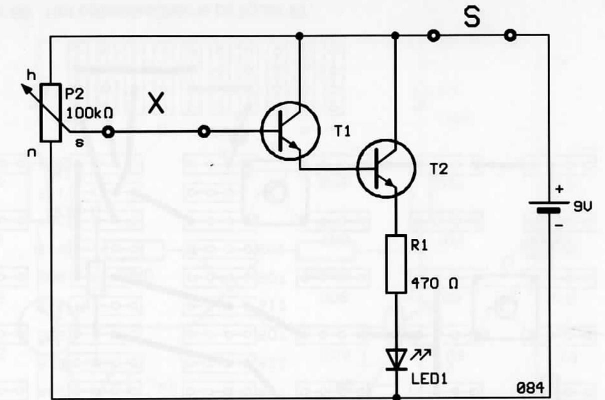


Figuur 83. Het opbouwschema bij figuur 82.

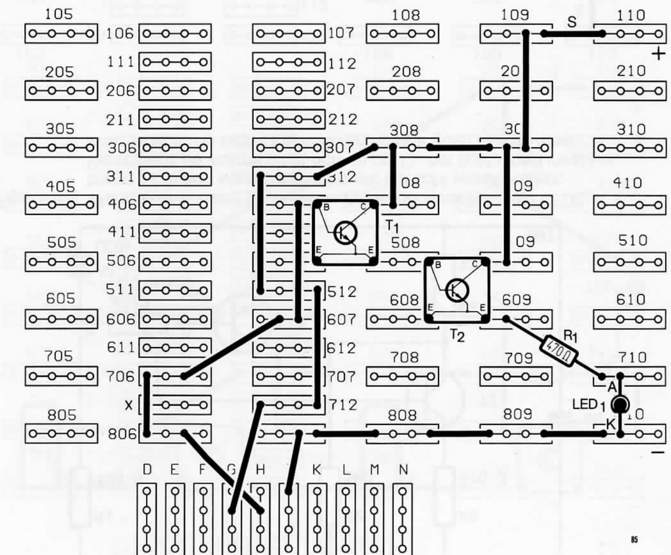
B x B - de stroomlawine

We gaan nog een andere interessante eigenschap van twee achter elkaar geschakelde emittervolgers onder de loep nemen.

52 Daarvoor onderzoeken we de schakeling zoals aangegeven in figuur 84. De loper van de potmeter wordt langzaam van beneden naar boven gedraaid. We houden de licht-emitterende diode in het oog en zien: om de diode helder te laten oplichten, moet de loper tamelijk hoog staan. Heeft de schakeling dus veel stuurstroom nodig? Dat zal de volgende proef uitwijzen.



Figuur 84. Darlington-schakeling - een gevoelige sensor. Heeft weliswaar veel stuurspanning nodig (P2 ver opdraaien), maar weinig stuurstroom. LED1 licht zelfs op als je het droge topje van je vinger gebruikt i.p.v. de brug X.



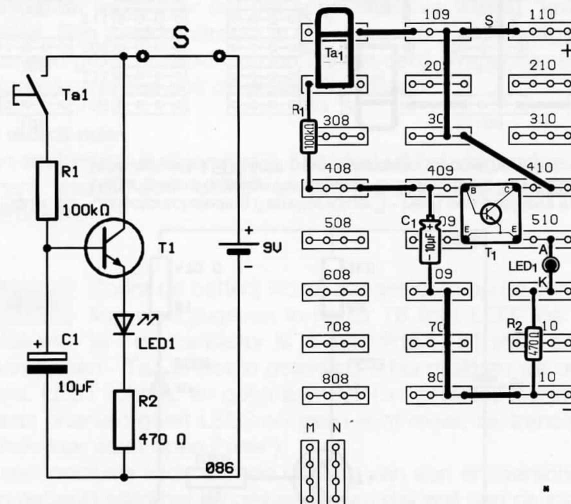
Figuur 85. Het opbouwschema bij figuur 84.

53 We verwijderen de brug X en gebruiken in plaats daarvan onze droge(!) vingertop. Tot onze verbazing stellen we vast: een lichte aanraking van de beide contactoppervlakken volstaat al om de LED helder te laten oplichten! Dat werkt zelfs wanneer we met iedere hand één van de oppervlakten aanraken.

We bekijken de schakeling eens wat beter en stellen vast: aan de stuurzijde moet nu enerzijds niet minder dan de dubbele basis-emitter-drempelspanning worden overwonnen. Bovendien volgt "achter" de tweede emitter nog de drempelspanning van de licht-emitterende diode. En zodra stroom begint te vloeien, komt er over de weerstand in de emitterkring ook nog een spanning te staan - alles bij elkaar een hele hoop.
Tot zover het slechte nieuws. Nu het goede: voor een uitgangsstroom van bijvoorbeeld 10 mA is in een dergelijke schakeling eerst voor T2 een basisstroom van 10 mA, gedeeld door B, de stroomversterkingsfactor, vereist. Laten we laag beginnen en zeggen B = 100. Dan heeft T2 100 μA nodig. Meer hoeft T1 niet te leveren. Als hij eveneens een versterkingsfactor heeft van B = 100, dan heb je voor de hele schakeling de belachelijk lage ingangsstroom van 1 μA nodig. Conclusie: deze transistorcombinatie, die *Darlington-schakeling* wordt genoemd, werkt als één transistor met een stroomversterking van B1 x B2. Zij kan ook met belasting in de collectorkring worden toegepast.

Emittervolger als "vertraagd licht"

We hebben al eerder, in hoofdstuk 6, een transistor gebruikt om processen in condensatoren duidelijker zichtbaar te maken. De zwakke basisstroom zorgt voor een tamelijk langzame ontlading van een condensator. De ontladingskromme is zoals we hebben gezien een exponentiële functie. Insiders weten dat die ontlading aan het eind nogal traag verloopt. Dat gebied kun je maar beter niet gebruiken. Hier biedt de emittervolger uitkomst.



Figuur 86. Condensator als "tijdelijke batterij": door een druk op Ta1 wordt *C*1 via *R*1 opgeladen - LED1 licht op. Als je de toets loslaat, zorgt *C*1 nog een poosje voor basisstroom én licht.

54 We bouwen de schakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 86 en drukken op de toets. Eerst gebeurt er een tijdje niets. Dan licht de LED op. Vervolgens laten we de toets los en - de LED blijft licht uitstralen. Met langzaam afnemende lichtintensiteit.
Via de toets die we in werking hebben gesteld, hebben we de condensator vanuit de batterij opgeladen. Die is zodoende zelf een "tijdelijke batterij" geworden. Zijn spanning, die door de basisstroom langzaam wordt verminderd, zorgt ervoor dat de transistor een poosje in geleiding blijft. De LED dooft wanneer de condensatorspanning ongeveer is gedaald tot de som van de LED-spanning van de LED en de drempelspanning van de transistor.

55 We herhalen de proef met grotere condensatoren: de tijd die nodig is voor het op- en ontladen wordt dienovereenkomstig langer. We verminderen daarom *R*1 tot 100 Ω. Nu hoef je nog maar even op de toets te drukken. U_C nadert praktisch tot U_B.

Drempel met gevoel

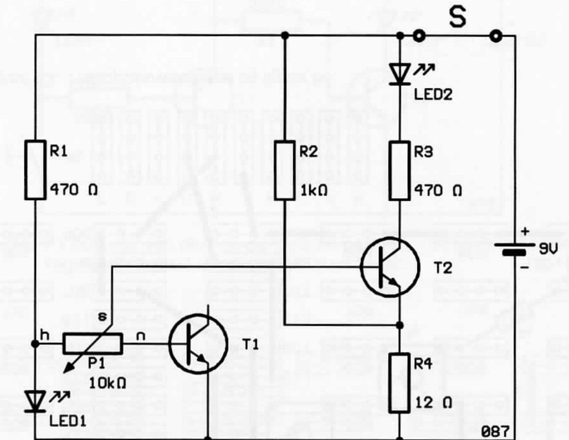
Drempelspanningen zijn afhankelijk van de temperatuur. Dat hebben we al in hoofdstuk 7 gezien. We gaan ons nu bezighouden met de consequenties daarvan en de maatregelen die we daartegen kunnen treffen.

56 We keren terug naar de schakeling zoals aangegeven in figuur 74 en begeven ons naar een donker hoekje. Daar stellen we de potmeter zo in, dat we de LED nog net niet kunnen zien oplichten. Dan verwarmen we de transistor voorzichtig met een föhn. We zien hoe de licht-emitterende diode langzaam oplicht en licht blijft uitstralen, zolang we warmte toevoeren. Daarna dooft ze langzaam. Je kunt het afkoelingsproces versnellen door voorzichtig gebruik te maken van een koude tang of iets dergelijks.
Verklaring: bij siliciumtransistoren daalt de drempelspanning telkens met ongeveer 2 mV wanneer de temperatuur 1 °C stijgt. Als de temperatuur wordt verhoogd van 20 °C tot 70 °C heeft de transistor voor dezelfde collectorstroom dus 100 mV minder basis-emitterspanning nodig dan bij kamertemperatuur. Wat kunnen we hiertegen doen?

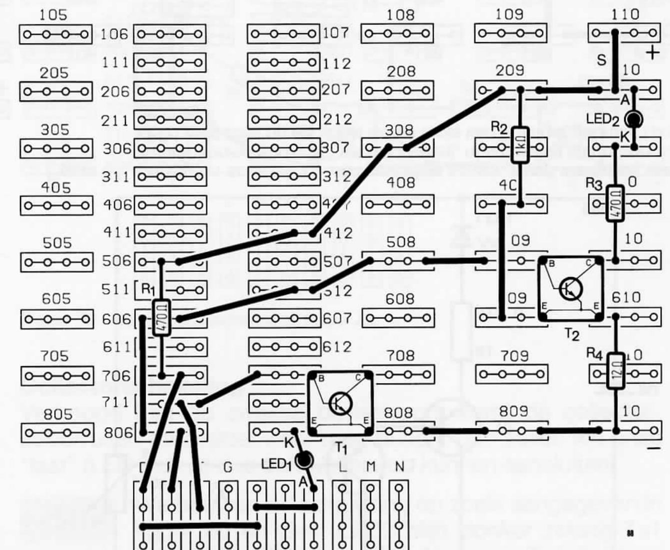
Compensatie door identieke transistoren

Op de chips van onze geïntegreerde schakelingen werkt het prima, maar ook met twee transistoren van hetzelfde type lukt het heel aardig: het compenseren van temperatuurinvloeden.

57 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 87 en stellen de potmeter zo in dat LED2 (groen) zwak oplicht (dat is dus in het eerste 1/3 van het instelbereik). Dan richten we onze föhn eerst op T1 (houd de warmtestroom eventueel met behulp van een stuk karton uit de buurt van T2): de lichtintensiteit wordt minder. Vervolgens verwarmen we alleen T2: LED2 licht weer feller op. Dan laten we het zaakje afkoelen en behandelen de beide transistoren gelijktijdig met de föhn - de lichtintensiteit verandert bijna niet meer!



Figuur 87. Warmte-invloeden: potmeter instellen op zwak licht van LED2, breng T2 in een warme luchtstroom; het licht wordt sterker. Vervolgens de warme lucht richten op T1: het licht wordt zwakker. Warme lucht op beide transistoren: vrijwel geen reactie meer.



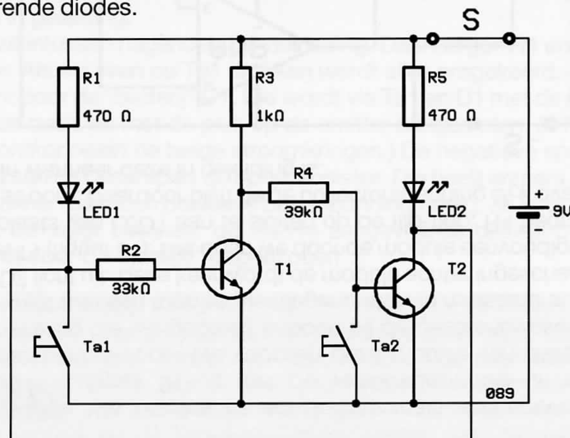
Figuur 88. Het opbouwschema bij figuur 87.

Verklaring: Als T1 wordt verwarmd, daalt de B-E-spanning van T1 en dus ook de voor T2 ingestelde spanning tot onder de drempelwaarde. Als daarentegen T2 wordt verwarmd, leidt de ingestelde spanning tot een sterkere collectorstroom. Als ze allebei tegelijkertijd worden verwarmd, wordt het effect van de veranderingen op de collectorstroom van T2 ongedaan gemaakt. Zoiets wordt *temperatuurcompensatie* genoemd.

9. Met z'n tweetjes geen probleem: het schakelen van transistoren

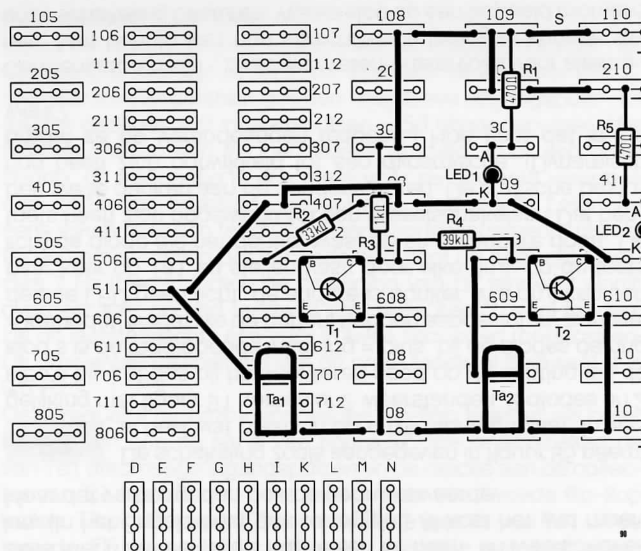
Waar je in je eentje moeite mee hebt, lukt veel beter in teamverband. Bij schakelingen zijn overgangen ongewenst. Een transistor die maar "half gesloten" is, zet vermogen om en wordt warm. Dit vermogen wordt aan de omgeving afgegeven en dus niet voor het gewenste doel gebruikt. Zulke overgangen worden voorkomen door samen te werken. We zullen nu "combinaties" van transistoren leren kennen die interessante effecten opleveren. Zij vormen ook belangrijke elementaire bouwstenen van computers. Hiervoor keren we terug naar figuur 78 ("2 x nee = ja").

58 In figuur 89 is in tegenstelling tot figuur 78 de collector van T2 verbonden met de bovenste aansluiting van Ta1. We stellen vast: aanvankelijk gebeurt er niets. Nu drukken we op Ta1. Zoals te verwachten was lichten beide diodes op. Als we Ta1 loslaten, blijven de diodes gewoon licht uitstralen! Pas een druk op toets Ta2 sorteert effect. Daardoor leiden we de basisstroom voor T2 tijdelijk om de transistor heen naar de min-pool. Nu pas doven de beide licht-emitterende diodes.



Figuur 89. "2 x nee = ja" met terugkoppeling resulteert in twee stabiele toestanden.

Onze conclusie luidt: als je van twee invertoren een "ring" vormt door een terugkoppeling van de uitgang op de ingang, ontstaat er een schakeling met twee stabiele toestanden. We gaan die nu meer geschikt maken voor het volgende doel:



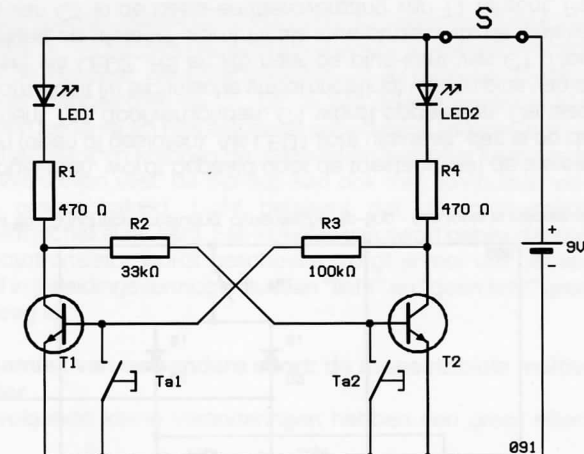
Figuur 90. Het opbouwschema bij figuur 89.

Stabiele dubbelzinnigheid: de statische flip-flop

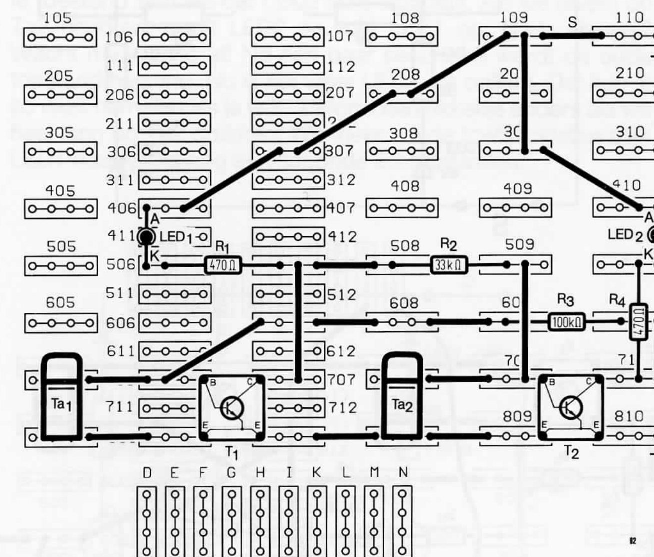
Deze schakeling is bekend onder meerdere namen: van de plastische aanduiding *flip-flop* (je hoort het gewoonweg "knippen") tot de officiële benaming *bistabiele multivibrator*. De schakeling slaat de toestand die je invoert op in het geheugen: de ene transistor geleidt, de andere spert. Totdat je het geheel naar de andere toestand overschakelt. Dan blijft die toestand stabiel. Het kleinste geheugen ter wereld.

59 We bouwen een dergelijke geheugencel volgens de aanwijzingen in figuur 91. De licht-emitterende diodes geven de toestand aan. We stellen vast: als de batterij wordt aangesloten, licht LED2 op. LED1 blijft donker. Door op Ta1 te drukken verandert er niets. Als je echter even op Ta2 drukt, wordt de situatie omgekeerd. Dat blijft zo totdat je op Ta1 drukt. Dan keer je terug naar de begintoestand.

Figuur 91 laat zien: T1 en T2 hebben niet dezelfde mogelijkheden, zelfs niet wanneer de gegevens absoluut gelijk zijn. *R*2 heeft een lagere waarde dan *R*3. Bij het inschakelen van de batterij krijgt T2 een grotere basisstroom. Zijn collectorspanning is daarom lager dan die van T1. Als gevolg daarvan krijgt T2 nog minder basisstroom en stijgt zijn collectorspanning. Aan het einde van het inschakelproces is T2 nagenoeg ingeschakeld voor min (U_{CE} minder dan 0,3 V). T1 daarentegen is "volkomen gesloten". Dat hele proces voltrekt zich bliksemsnel. Alleen op papier kun je het "in vertraagde beelden" weergeven - een goede manier om schakelfuncties te leren begrijpen!



Figuur 91. Statische flip-flop, hersencel van computers.



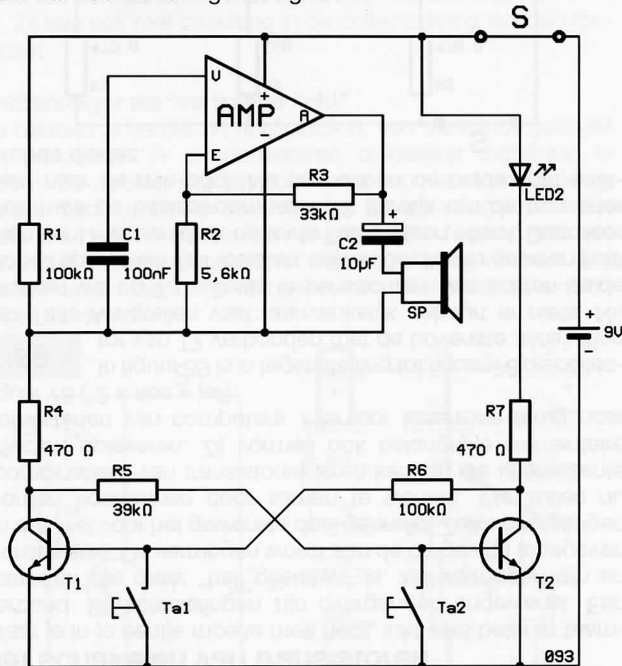
Figuur 92. Het opbouwschema bij figuur 91.

De flip-flop als vrijgezel

Op de chips van onze computers zijn vele tienduizenden flip-flop cellen met elkaar verbonden. Maar ook in z'n eentje is de "FF" een kranig baasje. Dan zijn het de details waar het op aankomt.

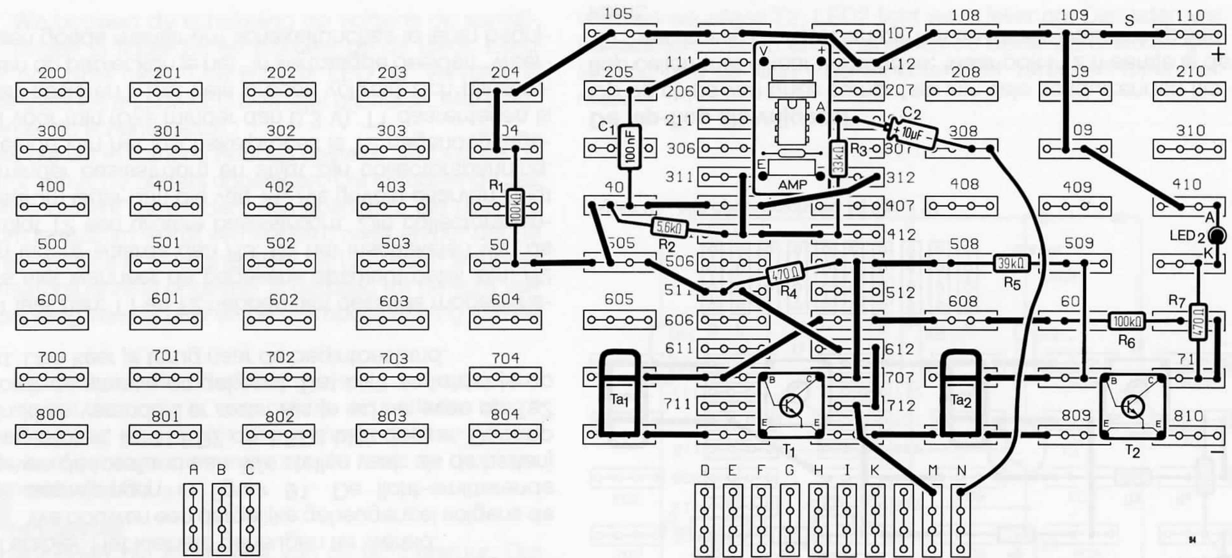
60 We verwisselen in figuur 91 *R2* en *R3*. Dan blijkt: als we nu de batterij inschakelen, licht LED1 op. De waarde van deze weerstanden is dus inderdaad bepalend voor de inschakeltoestand van onze flip-flop.
Dankzij dit trucje met de waarden is de FF een betrouwbare partner. Bijvoorbeeld in alarminstallaties.

61 We breiden de schakeling zoals aangegeven in figuur 91 uit met de versterkermodule uit onze experimenteerdoos. We voorzien deze module van dezelfde schakeling die we gebruikt hebben bij de geestenbezwering. Je krijgt dan een toonfrequentiegenerator. In ruststand straalt LED2 licht uit. Deze keer wordt de module echter ingeschakeld met T1 (figuur 91). Dat doen we door de module eenvoudigweg in plaats van LED1 aan te sluiten op de flip-flop. R4 begrenst de stroom. Daardoor blijft de de collectorspanning U_{CE} over T1 klein wanneer deze in geleiding is.



Figuur 93. De flip-flop als solist: na inwerkingstelling via Ta2 continu alarm. Opheffen (wissen) alleen met Ta1.

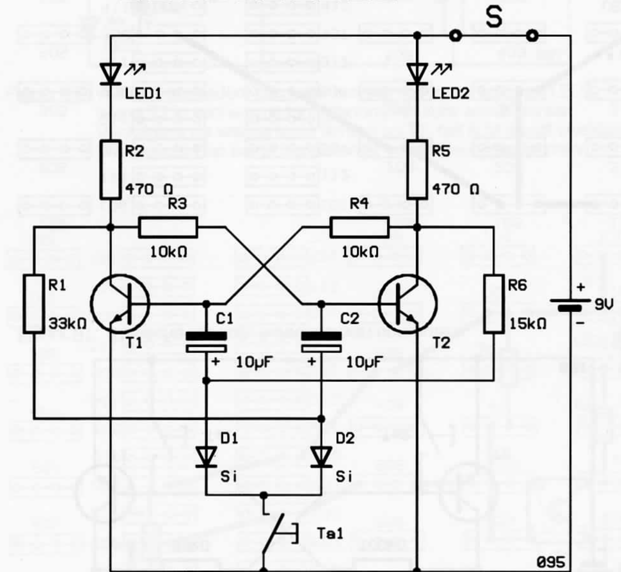
We stellen vast: de luidspreker geeft geen geluid. Als we op Ta2 drukken, wordt het alarm in werking gesteld. Het alarmsignaal blijft klinken, ook nadat we Ta2 hebben losgelaten. De FF heeft dus "onthouden" dat er iets aan de hand was. Terugkeer naar de ruststand is alleen mogelijk met Ta1.
Opmerking: in plaats van Ta2 wordt in de praktijk bijv. een schakelaar met magnetische bediening (*reed-relais*) aan een deurkozijn bevestigd. De schakelmagneet wordt zodanig op de deurvleugel gemonteerd dat hij, wanneer de deur wordt geopend, "in het voorbijglijden - heel even" het contact sluit. Dat volstaat om een aanhoudend lawaai te ontketenen. Inbrekers schrikken daarvoor terug. De Zaak voor Twee is opgelost.



Figuur 94. Het opbouwschema bij figuur 93.

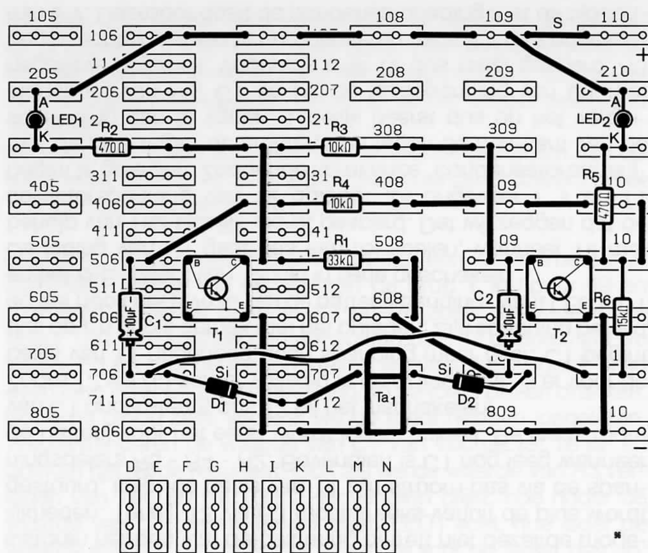
Eén in plaats van twee: dynamische flip-flop
Zelfs met maar één toets kun je een FF heen- en weerschakelen. (In het Engels heet dat: *to toggle*.) Al kost het wat meer. Maar dat verhoogt dan ook de gebruikswaarde.

62 De schakeling zoals aangegeven in figuur 95 neemt al heel wat plaats in op onze montageplaat. In vergelijking met figuur 91 komen er 2 weerstanden, 2 diodes en 2 elco's bij. Let dus bij het monteren goed op de richting (bij de elco's is de rondlopende inkeping = plus, bij de diodes de ring = kathode). Nadat we de batterij hebben aangesloten, zien we: de ene LED geeft licht, de andere is donker. We drukken een paar keer op Ta1 en stellen vast: door elke druk op de toets licht de diode die net donker was, op en de andere dooft. De toets heeft zich opgewerkt tot een wisselschakelaar! Dat hebben we te danken aan de condensatoren. De *statische* besturing heeft zich ontwikkeld tot een *dynamische*. (Dynamisch omdat ze op veranderingen reageert.) Hoe gaat dat in z'n werk?
Condensatoren zijn - zoals we weten - reservoirs voor elektronen. Met behulp van hun verschillende ladingen kunnen we onze schakeling besturen. Welke elco op een bepaald moment



Figuur 95. "Vluchtige" besturing: dynamische flip-flop - één toets is voldoende!

is opgeladen, wordt bepaald door de toestand van de transistoren (open of gesloten). Als LED1 licht uitstraalt, dan is op dat moment Ta1 doorverbonden. *C1* wordt opgeladen. De laadstroom vloeit (in technische stroomrichting) van de plus van de batterij via LED2, *R5* en *R6* naar de plus-kant van *C1*. Door "werking op afstand" komt hij als stuurstroom via de isolatielaag van *C1* in de basis-emitterovergang van T1 terecht. Pa-



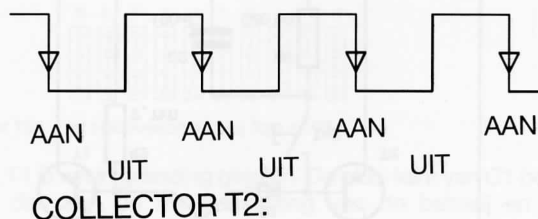
Figuur 96. Het opbouwschema bij figuur 95.

rallel daarmee komt een basisstroom via *R*4 tot stand. Terwijl de laadstroom praktisch tot nul daalt, wanneer de condensator is opgeladen, blijft de stroom via *R*4 doorvloeien. T1 blijft dus in geleiding.
*C*2 zit intussen nagenoeg zonder lading. Daar zorgen *R*1 en *R*3 voor. Als we even op Ta1 drukken wordt alles omgekeerd. Dat komt door de "batterij" *C*1. Die wordt via Ta1 en D1 met de min op de basis en met de plus op de emitter aangesloten. (D1 en D2 *ontkoppelen* de beide stroomkringen.) De negatieve spanning aan de basis spert de npn-transistor. Die heeft immers om te kunnen geleiden positieve basisspanning nodig. Je kunt het ook als volgt bekijken: de via *R*4 aangevoerde basisstroom wordt door *C*1 tijdelijk "weggezogen".

Insider-info 10
Je zult wel begrijpen dat de hoogte van de spanning die de sperrende lagen aankunnen beperkt is. Op de informatiebladen (die het "signalement" van onze bouwelementen bevatten) vind je hierover meer gegevens. Licht-emitterende diodes en de basis-emitterovergangen van bipolaire transistoren moet je niet met meer dan 5 V belasten. Al hangt het ook van de beschikbare energie af, of "een ietsje meer" al gevaarlijk is. Gelukkig vinden onze transistoren de negatieve condensatorspanning voor het sperren nog niet erg. Immers, de energie die de condensator te bieden heeft, is te gering.

Puls gedeeld door twee
Laten we eens wat gaan spelen met de wisselschakelaar. Bij elke tweede druk op de toets schakelt ook de collector van T2 om naar min. Er ontstaat dus een "negatieve uitgangspuls". Of anders gezegd: 100 ingangspulsen = 50 uitgangspulsen. We hebben zoëven een *frequentiedeler* ontdekt. Voor een goed begrip: de *frequentie* is een maat voor de snelheid waarmee een regelmatig herhaalde gebeurtenis plaatsheeft. Laten we eens kijken naar een tandwiel in een aandrijvingsmechanisme. Bij één omwenteling per seconde bedraagt de frequentie precies 1 Hz (*Hertz*). Indien de beweging van dit tandwiel wordt overgebracht op een tandwiel met twee keer zoveel tanden, zal dit laatste slechts één keer in twee seconden ronddraaien. De omwentelingssnelheid van dit grote tandwiel bedraagt dus 0,5 Hz.
Deze reductie bij onze dynamische flip-flop kunnen we beter beschrijven aan de hand van figuur 97. We onderzoeken de van Ta1 afkomstige ingangspulsen en de reactie aan de collector van T2. We kunnen deze pulsen naar een tweede flip-flop leiden. T2 uit de eerste FF neemt dan de functie van Ta1 uit de tweede FF over. Het is volkomen duidelijk: ook hier wordt gedeeld - tussen de eerste ingang en de laatste uitgang 2:1:0,5 ofwel 4:1! Met drie flip-flops kom je tenslotte uit op 8:1. Dit hele proces wordt tegenwoordig veel beter en op een uiterst klein oppervlak uitgevoerd door geïntegreerde schakelingen zoals de 4024 in onze experimenteerdoos. Daarover later meer.
Ook in z'n eentje is deze flip-flop goed te gebruiken. Dat blijkt uit het volgende experiment.

TOETS:

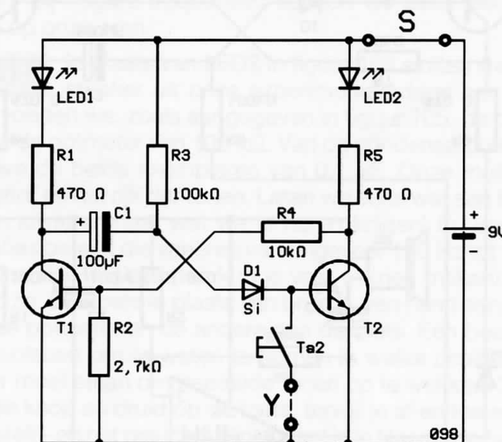


Figuur 97. Pulsdiagrammen van de toets en de uitgang van T2: slechts bij iedere tweede druk op de toets reageert de licht-emitterende diode LED2.

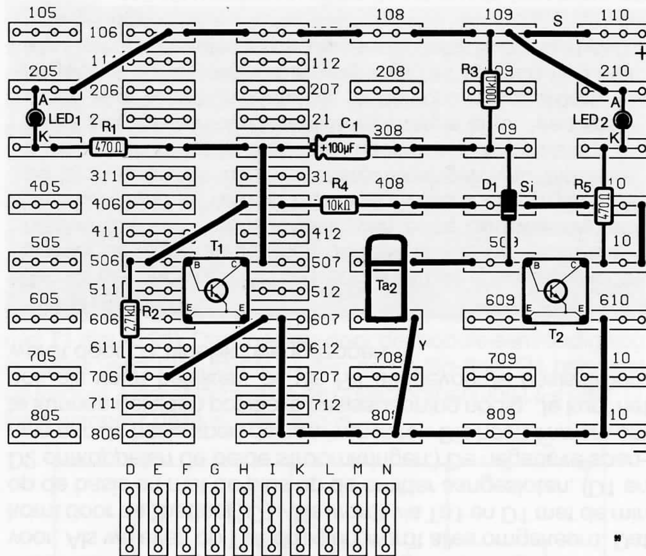
63 We vervangen in figuur 95 Ta1 door de fototransistor uit onze experimenteerdoos. Geheugensteuntje voor de montage: het korte pootje is van de collector. Dit moet worden aangesloten op D1, D2. In een donker hoekje richten we een zaklantaarn met een goed gebundelde lichtstraal op de fototransistor en knippen de zaklantaarn een paar keer aan en uit. We stellen vast: de flip-flop kan ook met lichtpulsen worden omgeschakeld. Licht betekent dat de fototransistor geleidt (schakelaar aan). Een kokertje van zwart papier dat over de fototransistor wordt geschoven, zorgt ervoor dat het verschil in geleidingsvermogen tussen "licht" en "geen licht" groot genoeg is.

Dynamiek van een andere soort: de monostabiele multivibrator
De volgende kleine veranderingen hebben een groot effect.

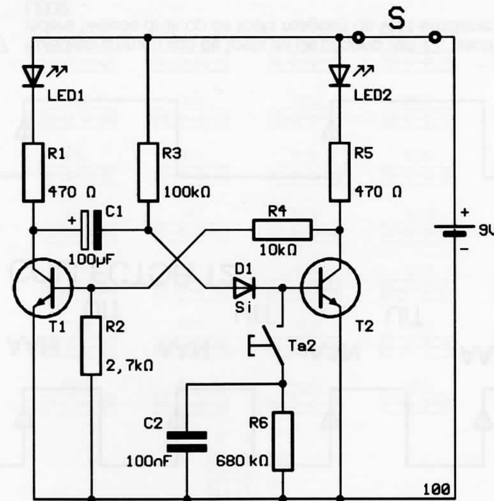
64 We brengen een kleine wijziging aan in de opbouw van onze dynamische flip-flop (figuur 98). In stabiele toestand zien we dat LED2 licht uitstraalt. Als we (even) op Ta2 drukken, dooft LED2 en licht LED1 op. Niets nieuws? Wacht maar eens af! Na een paar seconden wordt de oude toestand hersteld. Nu is het weer LED2 die oplicht. Dat kun je zo vaak herhalen als je wilt. 't Wordt een tikkeltje anders als we heel lang op Ta2 drukken. Wanneer we de toets loslaten blijft LED1 nauwelijks nog een seconde licht uitstralen.



Figuur 98. Stabiel met "vluchtige" toestand: de monoflop. *R*3 en *C*1 bepalen hoelang LED1 na een druk op de toets licht blijft geven.



Figuur 99. Het opbouwschema bij figuur 98.



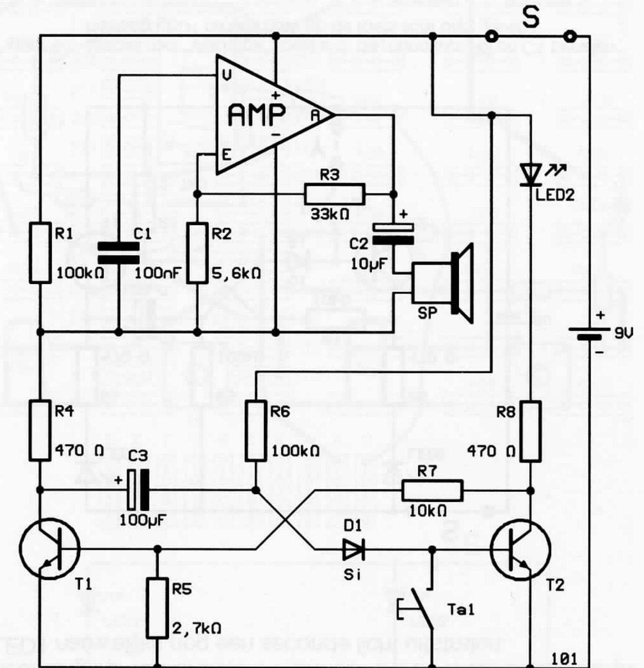
Figuur 100. Dynamische starttoets bij de monoflop: je kunt er op drukken zolang als je wilt!

65 We overbruggen D1 en herhalen de proef waarbij we even op de toets drukken. Nu geeft LED1 aanzienlijk korter licht. Als je te lang op Ta2 drukt, licht LED2 vrijwel direct nadat je de toets hebt losgelaten, weer op.

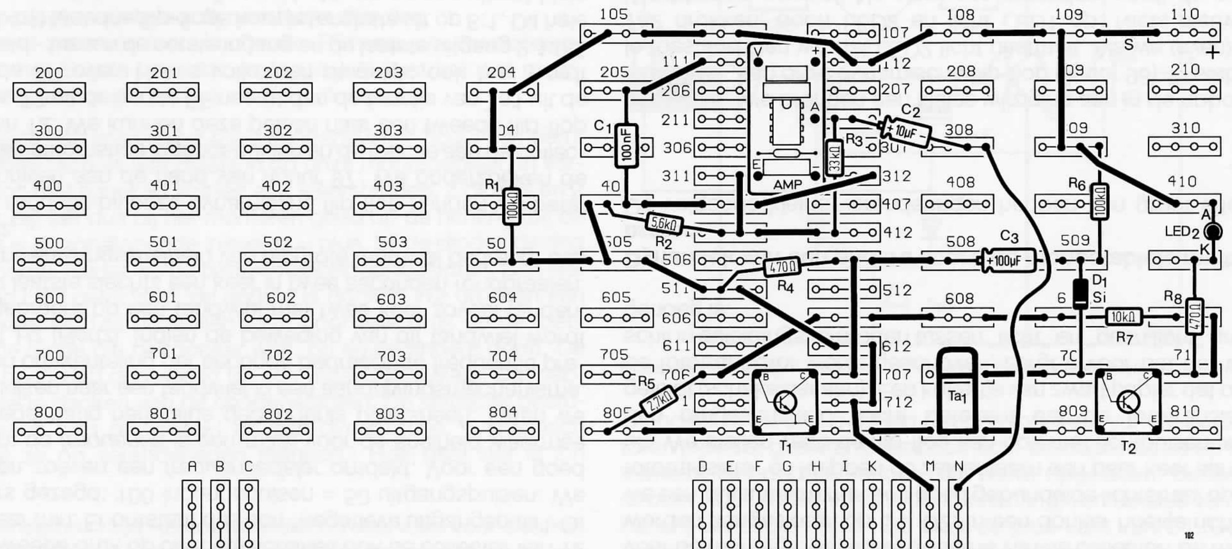
Laten we de resultaten eens op een rijtje zetten: de beide transistoren hebben wat de besturing betreft niet dezelfde mogelijkheden. Terwijl T2 via *R*3 rechtstreeks vanuit de plus wordt gestuurd, krijgt de basis van T1 zijn stroom pas via de spanningsdelers *R*5 - *R*4 - *R*2. Bovendien is *C*1 nog leeg wanneer de batterij voor het eerst wordt ingeschakeld. De laadstroom van *C*1 ondersteunt dus T2 bij het inschakelen.

Zodra T2 via *R*3 echter volledig in geleiding gaat, is er voor de basis van T1 nagenoeg geen spanning meer over. *C*1 begint dus op z'n dooie gemak met het opladen. Zijn spanning bereikt echter nooit het niveau van de batterijspanning, want LED1, D1 en het B-E-traject van T2 zijn in serie geschakeld.

De lading van *C*1 gaat pas een rol spelen, wanneer T2 met behulp van Ta2 tijdelijk wordt gesperd. Dat wil zeggen dat de collectorspanning van T2 oploopt tot ongeveer 7 V en T1 begint te geleiden. Zodoende komt onze "condensatorbatterij" met de plus tegen de emitter, dus tegen de min-kant van de schakeling aan te liggen. Tijdelijk heerst dus op het verbindingspunt van *R*3, *C*1 en D1 de laadspanning van *C*1 met negatieve polariteit. Voorlopig blijft T2 dus zeker gesperd. *R*3 begint echter meteen te compenseren: plus 9 V met ongeveer min 6 V. Daardoor daalt de condensatorlading met de tijdconstante *R*3 x *C*1. (Wat de tijdconstante is hebben we in hoofdstuk 6 geleerd.) Daar komt nog bij dat de laadstroom van *C*1 ... maar dat hebben we al gehad. Bovendien wordt nu duidelijk



Figuur 101. Mono-alarm: de tijdsduur ervan is zeer beperkt.



Figuur 102. Het opbouwschema bij figuur 101.

dat alles veel sneller gaat zonder D1 - T2 verbindt dan namelijk al tussen 0,6 V en 0,7 V weer door. Een dergelijke schakeling die maar één ("mono") stabiele toestand heeft, wordt een *monostabiele multivibrator* genoemd, of wat minder deftig een *monoflop*.
Nu zitten we alleen nog met het vervelende probleem van de toets waar te lang op is gedrukt. Ook voor dit probleem biedt "condensator-dynamiek" de oplossing.

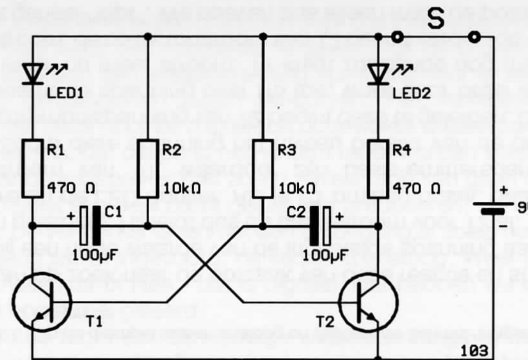
66 We breiden figuur 98 uit met een kleine truc-schakeling. We verwijderen de brug Y in figuur 99 en monteren in plaats daarvan *C2* en *R6* zoals aangegeven in figuur 100. We kunnen dan net zolang op Ta2 drukken als we willen. En tot ons genoegen stellen we vast: LED1 geeft altijd even lang licht. En als we heel lang op de toets blijven drukken, dooft de diode zelfs voordat we de toets hebben losgelaten. We verminderen de waarde van *C1* van 100 µF tot 10 µF en boeken hetzelfde resultaat. Ook als we de waarde van *R3* verlagen van 100 kΩ tot 10 kΩ. Bovendien blijkt: hoe hoger de waarde van *C1*, des te langer geeft LED1 licht, hoe lager de waarde van *R3*, des te korter straalt ze licht uit. Maar pas op: gebruik geen te hoge waarde bij *R3* (bijv. 680 kΩ): T2 zal dan niet meer goed in geleiding zijn!
Er is niet veel fantasie voor nodig om je voor te stellen wat je allemaal kunt doen met zo'n "korte-tijd-pulsgever".

67 We monteren onze *monoflop* in plaats van de flipflop in figuur 93. Nu klinkt er slechts een kort alarm wanneer de deur wordt geopend. Dat zou toch een handig winkelbelletje zijn voor tante Emma, of niet?

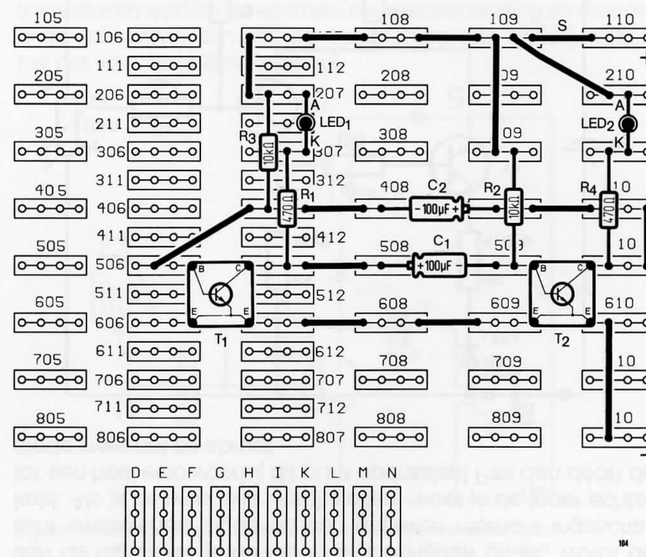
Eigen dynamiek: de astabiele multivibrator

Als je vrolijk op de toets blijft drukken kun je de dynamische flip-flop ook als dubbel knipperlicht gebruiken waarvan de lampjes om de beurt aan en uit gaan. Maar ook hier werkt een elektronische schakeling beter.

68 We veranderen de opbouw van figuur 98 een beetje (zie figuur 103). Inderdaad, het licht knippert vanzelf! Onvermoeibaar, zoals het een automaat betaamt. We stellen de gebruikelijke vraag: hoe gaat dat in z'n werk?
In feite hebben we dit effect stapje voor stapje bereikt. Laten we nog maar eens naar de monoflop kijken. De zojuist opgebouwde "AMV" (in de vaktaal van de technici de aanduiding voor de astabiele multivibrator) is eigenlijk nagenoeg een dubbele uitvoering van de linkerhelft van de "MF": *R2* en *R3* leveren de stroom voor de basisaansluitingen, *C1* en *C2* zorgen voor beweging. Aangezien beide gedeelten echter via condensatoren met elkaar zijn verbonden, blijft het aan geen van beide kanten stabiel. In dit geval zijn de beginvoorwaarden gelijk. Daarom wint in eerste instantie de transistor met de grootste versterking. Als eenmaal "de richting is ingeslagen" verloopt het proces verder als volgt:



Figuur 103. Veelzijdig talent: de astabiele multivibrator. *C1* en *C2* zorgen voor beweging; samen met *R2* en *R3* bepalen zij hoelang elke toestand blijft bestaan.


Figuur 104. Het opbouwschema bij figuur 103.

Stel, T1 is net in geleiding gegaan. De plus-kant van *C1* bevindt zich dan aan de min-aansluiting van de batterij en spert zodoende T2. Terwijl *R2*, die groter is, nog bezig is met het omladen van *C1*, wordt *C2* veel sneller opgeladen tot meer dan 6 V - vanuit de gesperde collector van T2 via de basis-emitterovergang van T1. Parallel daarmee vloeit via *R3* basisstroom naar T1. Maar nu bereikt de lading van *C1* het kritieke niveau: van -6 V (gerelateerd aan de basis van T2 in de richting van min) is hij door de stroom via *R2* tenslotte tot ongeveer +0,6 V opgeladen. Dat volstaat om T2 te laten geleiden. Daardoor wordt de plus-laag van *C2* steeds meer naar min "getrokken". Zodoende leidt hij de basisstroom van T1 af. De collectorspanning van deze stijgt, omdat een daling van de basisstroom een daling van de collectorstroom tot gevolg heeft. Op die manier ondersteunt *C1* de basisstroom voor T2. Als T2 dus eenmaal begint te geleiden gaat de rest tamelijk snel.
Daarna is het weer even rustig - LED2 geeft licht, LED1 is donker. Totdat de spanning aan de min-kant van *C2* gestegen is tot de drempelwaarde van de basis van T1. Hoe het verder gaat, weten we al.
Het resultaat van dit voortdurend heen- en weervloeien zijn blokgolven aan de beide collectoren. Een LED die oplicht, geeft steeds de geleidingstijd van de betreffende transistor aan. Als de bouwelementen dezelfde waarde hebben, zijn hun geleidingstijden gelijk.
Bij nader inzien is het dus hoofdzakelijk dit tweetal, bestaande uit basisweerstand en condensator, dat deze tijden bepaalt. Het "linker" paar is verantwoordelijk voor de spertijd van de "rechter" transistor (dus de geleidingstijd van de linker), het "rechter" paar voor de spertijd van de "linker" transistor.

69 We controleren deze beweringen met enkele waarden voor *R2*, *R3* en *C1*, *C2*. In de symmetrische eerste opstelling knipperen de LED's rustig en gelijkmatig. Zo'n schakeling is geschikt voor een bakenlicht e.d. Bij kleinere capaciteiten wordt het onrustiger, maar dat kun je weer compenseren door weerstanden met hogere waarden te gebruiken - zolang ze nog voldoende basisstroom doorlaten.

Voor het oog èn het oor

Wat we al wisten: in de opgaaf van de frequentie komt tot uitdrukking, hoe vaak per seconde een toestand wordt herhaald. Onze ogen zijn in staat dit te onderscheiden tot maximaal ongeveer 20 Hz. Dan gaat het flikkeren over in continu licht geven. Bij hogere frequenties kunnen we beter een beroep doen op onze oren.

70 In plaats van LED2 in figuur 103 sluiten we de luidspreker uit onze experimenteerdoos aan. Bovendien voeden we, zoals aangegeven in figuur 105, de basis van T1 via de potmeter van 100 kΩ. Van de condensatoren gebruiken we de beide exemplaren van 0,1 µF. Onze multivibrator betreedt nu het rijk der tonen. Laten we eens wat aan P2 draaien en luisteren naar wat we te horen krijgen! Er worden frequenties bereikt die variëren van ongeveer 150 Hz tot iets minder dan 2 kHz. Daarmee kun je vast muziek maken! Bijvoorbeeld zo: een toets in plaats van brug X, één hand aan de knop van de potmeter en de andere aan de toets. Een beetje oefening volstaat om te weten te komen in welke positie de potmeter moet staan om bepaalde tonen op te wekken. Je draait aan de knop en drukt op de toets, terwijl je af en toe een beetje bijstelt - en het resultaat klinkt alsof je in Hawaïï op het strand ligt... En als je de muziek te zacht vindt, verlaag je de waarde van *R4* tot 100 Ω. Al vloeit er dan wel veel stroom, zodat je op den duur goedkoper uit bent met de KOSMOS-nettransformator X.

Figuur 105. Wie niet kijken wil, mag luisteren: de multivibrator voor de geluidfrequentieband (luidspreker i.p.v. LED2). Groter volume door toepassing van 100 Ω voor *R4*. LED1 dient alleen nog maar om aan te geven dat alles "goed werkt". (Handig bij frequenties boven de gehoorgrens, bijv. met 6800 pF i.p.v. 0,1 μF.)

Figuur 106. Het opbouwschema bij figuur 105.

De astabiele multivibrator is dus een uiterst veelzijdige schakeling, niet alleen geschikt voor toepassing in waarschuwingsknipperlichten, maar ook als testsignaalgenerator, elektronische muziek en tenslotte als "elektronisch hart" - als kloksignaalgenerator in digitale schakelingen.

Drempels met sprong: de Schmitt-trigger

Opnieuw verbinden we twee transistoren met elkaar. Maar deze keer "gemengd" - tussen basis en collector en aan de gemeenschappelijke emitterkant.

71 Voor dit experiment bouwen we de schakeling op zoals aangegeven in figuur 107 en houden LED1 in het oog. Ze straalt licht uit of is donker - al naargelang de positie van P1. Maar met deze afhankelijkheid is iets merkwaardigs aan de hand. Als je de loper naar beneden draait, wordt de licht-emitterende diode op een gegeven moment ingeschakeld. Als je ze weer wilt uitschakelen, moet je de loper echter tot een heel eind voorbij dit punt opdraaien! Pas dan dooft de diode weer net zo abrupt.

Figuur 107. Op de drempel tussen analoog en digitaal: de Schmitt-trigger met hysteresis.

We gaan op zoek naar de oorzaak van deze reactie en stellen vast: bij een hoge waarde van de ingestelde spanning aan P1 is T1 in geleiding. Hij leidt dus de basisstroom voor T2 af. T2 is gesperd en de LED donker. Als je P1 omlaag draait, daalt de basisstroom van T1, waardoor zijn basis-emitterspanning stijgt. Zodra deze spanning het niveau bereikt van de basis-emitterdrempelspanning van T2 begint deze te geleiden. Daardoor neemt de spanning over *R5* toe, want door deze weerstand vloeit nu meer stroom. T1 krijgt zodoende nog minder basisstroom, de collectorstroom van T2 neemt verder toe - totdat het geheel "kipt". We hoeven dus alleen maar de potmeter

Figuur 108. Het opbouwschema bij figuur 107.

in de kritieke zone in te stellen en de schakeling zorgt zelf voor de rest. Vandaar de naam *drempelwaardeschakelaar*.

Nadat de schakeling is gekipt, vloeit er door *R5* een relatief hoge stroom. In figuur 107 is dat ongeveer 10 mA. Over *R5* staat dus ongeveer 1,5 V. Logisch - om ervoor te zorgen dat T1 weer kan geleiden heb je aan de potmeter een tamelijk hoge spanning nodig - ongeveer 2,1 V in de richting van min. Je moet de potmeter dus een behoorlijk eind opdraaien. Maar dan gaat het ook pijlsnel precies in de tegenovergestelde richting. Aangezien T1 nu steeds meer basisstroom van T2 "wegzuigt", daalt ook de spanning over *R5*, en T1 blijft er stevig aan trekken. Zijn zwakke collectorstroom (ongeveer 0,6 mA) brengt over *R5* amper 90 mV tot stand. Deze reactie wordt *hysteresis* genoemd. Overigens stellen we vast: het "dode gebied" (de hysteresis) tussen de schakelpunten hangt af van de verhouding van de stromen van de beide transistoren. Het gebied wordt kleiner als je *R3* en/of *R5* verlaagt en/of *R6* verhoogt.

Maar wat is eigenlijk het nut van een dergelijke hysteresis? We geven twee voorbeelden waarbij zo'n hysteresis wordt toegepast.

1. Een straatlantaarn wordt bestuurd door een schemerschakelaar. Wanneer het 's avonds alsmaar donkerder wordt gaat de lantaarn aan. En 's morgens gaat hij uit, zodra er voldoende daglicht is. Het kan overdag echter zwaar bewolkt zijn. Het zou niet goed zijn als het aan- en uitschakelpunt zo dicht bij elkaar liggen, dat door de aanwezigheid van een wolk de lantaarn wordt ingeschakeld. Dankzij de uitvinding van meneer Schmitt kunnen we dat vermijden.

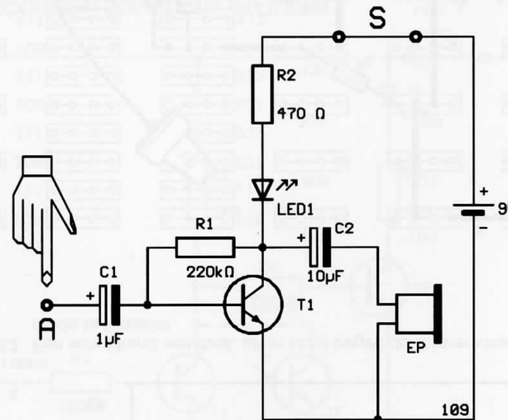
2. Een apparaat wordt gevoed door een accu. Het wordt uitgeschakeld wanneer (de waarde van de) accuspanning - door ontladen - de drempelwaarde heeft bereikt. Wanneer het apparaat is uitgeschakeld, neemt de spanning echter weer iets toe. Alleen met behulp van een automatische inrichting als de Schmitt-trigger kunnen we voorkomen dat dit tot een voortdurend en zinloos aan- en uitschakelen leidt.
Tenslotte vormen drempelwaardeschakelaars belangrijke "raakpunten" tussen de analoge en de digitale wereld. Schakelingen die alleen onderscheid maken tussen "ja" en "nee" hebben zo'n tolk nodig: van "niet helder" tot "een beetje helder" = Nee, van "tamelijk helder" tot "stralend helder" = Ja. Het grijze overgangsgebied wordt vermeden.

10. De transistor als versterker

De transistor is tegenwoordig het belangrijkste bouwelement in de elektronika - hetzij in zijn oorspronkelijke vorm als "solist" in zijn eigen kastje, hetzij samen met een groot aantal andere, geïntegreerd op een chip. Dat er niet simpelweg sprake is van dé transistor weten we al. Verschillende natuurkundige effecten hebben geleid tot allerlei oplossingen en elke oplossing heeft zijn toepassingsmogelijkheden. Bipolaire transistoren met de zonevolgorde npn en pnp genieten vanwege hun degelijkheid in de praktijk nog steeds de voorkeur.
De belangrijkste taak van de transistor is het versterken en alle toepassingsmogelijkheden die daarmee samenhangen. We hebben al gezien dat de bipolaire transistor in de eerste plaats een stroomversterker is: een zwakke basisstroom leidt tot een sterke collectorstroom. Als je in de uitgangskring een weerstand invoegt, veroorzaakt de versterkte stroom een spanningsdaling die des te groter is naarmate er meer stroom naar de basis vloeit - totdat de transistor al zijn op dat moment beschikbare ladingdragers heeft gemobiliseerd. Dan is hij verzadigd. Meer kan hij niet hebben. Dit is de bovengrens van het versterkingseffect. De benedengrens is gesteld door het feit dat een ingangsstroom pas kan gaan vloeien wanneer de diodespanning van de basis-emitteringangsdiode is overschreden. Onder ongeveer 0,6 V gebeurt er dus niets. Boven deze waarde moet ervoor gezorgd worden dat de ingangsstroom binnen de toegestane grenzen blijft. Onze minitransistoren beginnen al te protesteren bij een basisstroom van meer dan 50 mA. Stroom kun je begrenzen met behulp van weerstanden. Dat wist je al en mag je trouwens ook nooit meer vergeten. Maar wat te doen, als de spanning van de bron waarvan het "signaal" versterkt moet worden, niet over de ingangsdrempel heen komt of zelfs tegengesteld is in polariteit?

Versterker voor wisselspanning

Een wisselstroom verandert voortdurend van richting zoals we in hoofdstuk 6 hebben gezien. Voor zo'n wisselstroom vormt een condensator dus nauwelijks een obstakel - in tegenstelling tot de gelijkstroom, die door een condensator onherroepelijk wordt gesperd. Wisselstromen zijn voor ons interessant omdat - om maar eens een voorbeeld te geven - uit de uitgang van een microfoon een wisselspanning komt wanneer er aan de ingang geluidsgolven tegen aanbotsen. Het vervelende is alleen dat deze door de microfoon opgewekte wisselspanning zo miniem is, dat die eerst nog enorm moet worden versterkt, voordat de luidspreker met zo-en zoveel foon kan gaan dreunen. Of juist een heel zacht geluid kan produceren, als wij dat willen. De versterker levert het aan de uitgang af zoals het aan de ingang wordt ingevoerd. Hij versterkt *analoog*. Weet je het nog? Alleen Ja of Nee - dat is *digitaal*. Dat hebben we in het vorige hoofdstuk geleerd.
Figuur 109 toont een eenvoudige wisselspanningsversterker. De te versterken wisselspanning kan via de condensator (vrijwel) moeiteloos de basis van de transistor bereiken. Voor een eventuele gelijkspanning zou deze weg zijn gesperd. Maar transistoren werken nu eenmaal met gelijkspanning en daarom is de schakeling dan ook aangesloten op een batterij. Wat is het nut van die gelijkspanning?



Figuur 109. Eenvoudige wisselspanningsversterker: versterkt zelfs "brommende geluiden uit de vinger"! ($R1=R_B$, $R2=R_C$)

Gedeelde batterijspanning

Het klinkt een beetje gek: om ervoor te zorgen dat de wisselspanning op de juiste manier kan worden versterkt dient de transistor door toedoen van de gelijkspanning voortdurend een beetje geleidend worden gehouden - ook als het vóór de microfoon doodstil is. Dat wordt aangegeven door LED1. Met behulp van de weerstand tussen de collector en de basis haalt de transistor als het ware zelf uit zijn collectorspanning de basisstroom om te kunnen geleiden. Als je bijvoorbeeld de waarde van deze weerstand zo kiest dat het verschil tussen deze waarde en die van de collectorweerstand gelijk is aan de factor van de transistorstroomversterking, dan bedraagt de collectorspanning ongeveer de helft van de batterijspanning. Dus: $U_C = U_B/2$ terwijl $R_B = B \times R_C$.

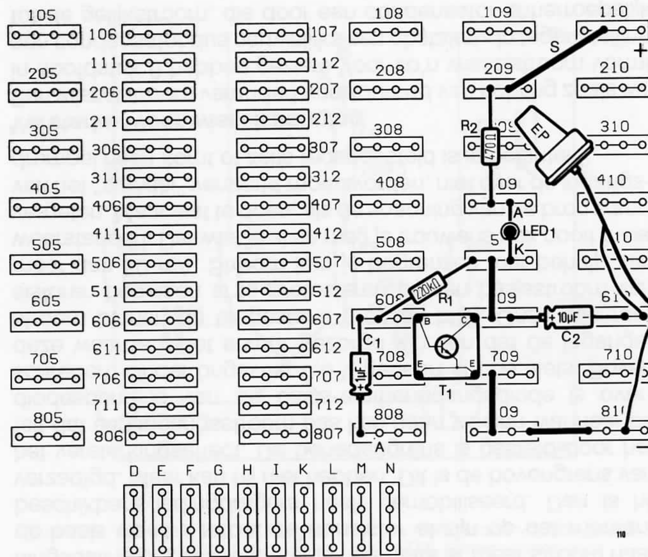
Insider-info 11
De basisstroom op zijn beurt wordt berekend aan de hand van de formule: $I_B = (U_{CE} - U_{BE})/R_B$. Als we, om het eenvoudiger te maken, de LED-spanning van de licht-emitterende diode voor onze berekening aftrekken van de batterijspanning en de uitkomst de nieuwe batterijspanning U_B noemen, is de collector-emitterspanning te berekenen volgens de formule $U_{CE} = U_B - B \times I_B \times R_C$. In plaats van I_B schrijf je $I_B = (U_{CE} - U_{BE})/R_B$. Daar kun je alle interessante gegevens uit afleiden. Deskundigen ontwerpen een klein computerprogramma om het verloop van de spanning aan de collector over de weerstand R_B of ook wel afhankelijk van de stroomversterking bij een vaste waarde van R_B in een grafiek weer te geven. 'n Klein steuntje bij het nadenken: de batterijspanning U_B verminderd met de LED-spanning bedraagt ongeveer 7 V, de basis-emitterdrempelspanning U_{BE} ca. 0,6 V.

Deze waarde komt nu goed van pas: laten we eens aannemen dat een (denkbeeldige) microfoon een wisselspanning afgeeft aan de basis. Aangezien de polariteit van deze wisselspanning voortdurend verandert "schommelt" ook de collectorspanning rond de genoemde gemiddelde waarde van de batterijspanning op en neer. Deze wordt via de condensator *C2* naar de oortelefoon geleid.

De bromtest van opa opnieuw tot leven gewekt

72 We bouwen de wisselspanningsversterker op zoals aangegeven in figuur 110 (schakelschema in figuur 109). Voor de uitvoering van onze eerste proef maken we gebruik van een truc die opa met zijn oude, met buizen uitgeruste radiotoestel al kon waarderen: wij zijn voortdurend en overal omgeven met de elektrische velden van 50 Hz van onze energievoorziening. Ons lichaam reageert op deze omgeving als een condensator met een capaciteit van een paar honderd picofarad. Het is zodoende een prima "bron voor bromgeluiden". Als je de open uitgang A van de wisselspanningsversterker aanraakt begint het in de oortelefoon te brommen: net alsof er een wisselspanning via een condensator (jij dus!) op de ingang is aangesloten.

73 Je kunt natuurlijk ook eens proberen of je de muziek uit de draagbare radio of de walkman kunt versterken; als je een beetje behendig bent sluit je dan de beide polen van de hoofdtelefoonaansluitingen van de radio aan op de ingang A en de min-pool van onze schakeling.



Figuur 110. Het opbouwschema bij figuur 109.

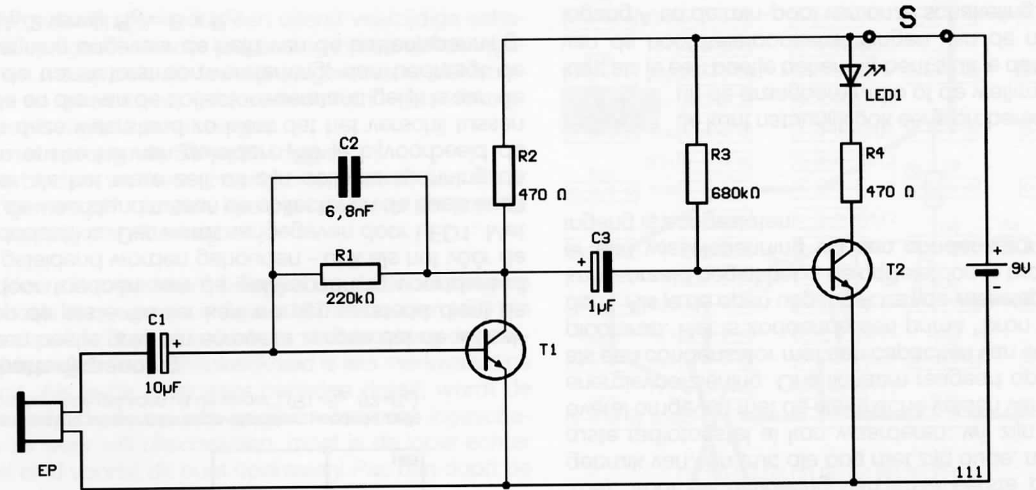
Werkpunt en negatieve terugkoppeling

Door de schakeling op de juiste wijze aan te passen hebben we zojuist een transistor gevoed met een zekere hoeveelheid basisstroom. Daardoor kan hij *signaalspanningen* versterken. De vakman noemt dat het *instellen van het werkpunt*. Die signaalspanning was in dit geval een wisselspanning. In andere schakelingen kan dat ook een hele kleine gelijkspanning zijn die (*analoog*) moet worden versterkt.
Het verbinden van de collector (uitgang) en de basis (ingang) middels een weerstand wordt overigens *negatief terugkoppelen* genoemd. Door het aanbrengen van een *negatieve terugkoppeling* krijg je een behoorlijk stabiel werkpunt; bovendien zorgt een negatieve terugkoppeling ook voor een vermindering van eventuele vervormingen van gesproken woord en muziek.

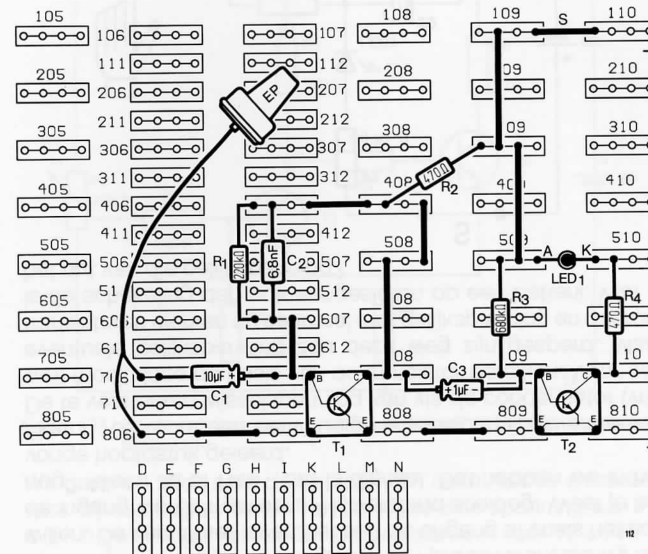
Klopsignalen

Een microfoon wordt niet alleen gebruikt voor gesproken woord en muziek. Dat blijkt uit het volgende experiment.

74 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 111. Het resultaat is een klein seismologisch station, dat heel gevoelig is voor trillingen en daarop reageert met flikkerende lichtsignalen.



Figuur 111. Een schokkend resultaat: als je klopt begint de licht-emitterende diode te flikkeren.



Figuur 112. Het opbouwschema bij figuur 111.

Als microfoon gebruiken we de oortelefoon, want het principe daarvan is omkeerbaar: wisselspanning wordt omgezet in geluid, maar geluid ook in wisselspanning. Niet direct een hoge spanning, maar de beide versterkertrappen voeren die wel op.

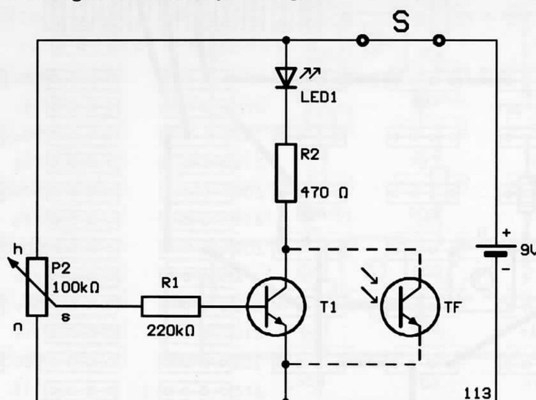
Je kunt de oortelefoon het beste op een tafelblad leggen en daar dan flink op kloppen. Voor hogere frequenties is het apparaat minder gevoelig. Dat komt door C2. In de oortelefoon zit een magneetspoel, een inductiviteit, waarvan de weerstand toeneemt naarmate de frequentie stijgt. De weerstand van de capaciteit wordt daarentegen kleiner wanneer de frequentie stijgt. Met het stijgen van de frequentie wordt dus de naar het basisknooppunt vloeiende negatieve terugkoppelingsstroom sterker, terwijl de ingangsstroom vanuit de oortelefoon zwakker wordt. Aangezien de ohmse weerstand van de oortelefoon nogal klein is heb je de koppelcondensator nodig, anders zou de basisovergang gesperd blijven. De tweede trap van de schakeling krijgt zijn basisstroom via een weerstand rechtstreeks uit de batterij. Dat betekent dat de compenserende werking voor het werkpunt ontbreekt, zodat dit meer afhankelijk is van de stroomversterking. De waarden zijn zo gekozen dat de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode, uitgaande van een gemiddelde waarde, in beide richtingen duidelijk verandert als ter plaatse het tafelblad begint te trillen.

Geleidelijke overgangen

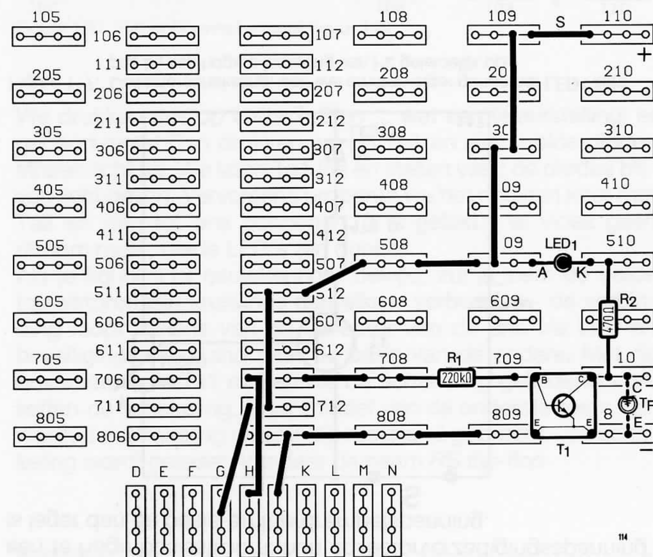
Met de volgende schakeling keren we terug naar de geleidelijke overgangen die kenmerkend zijn voor de analoge techniek.

75 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 113 en draaien de loper van de potentiometer behoedzaam van de aanslag n naar rechts. We merken op: al bij een tamelijk kleine verdraaiing begint de licht-emitterende diode zwakjes te gloeien. De lichtintensiteit neemt alsmaar toe naarmate we verder draaien en bereikt nog vóór de aanslag h de maximale sterkte. Dat kun je zo vaak herhalen als je

wilt, ook in omgekeerde richting. Het langzame doven tijdens het terugdraaien doet denken aan het effect van de bekende dimschakelingen waarmee je energie kunt besparen.



Figuur 113. Eenvoudige gelijkstroomversterker: LED1 wordt donkerder naarmate de loper verder in de richting van n wordt gedraaid ("lichtdimmerschakeling").



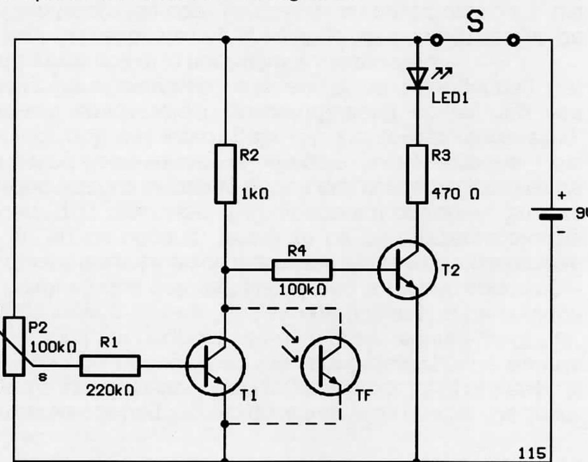
Figuur 114. Het opbouwschema bij figuur 113.

De "verloren gang" aan het begin vindt zijn oorzaak in de basis-emitterdrempelspanning van ca. 0,6 V. Zoveel spanning moet er minstens op het aftakpunt aanwezig zijn om ervoor te zorgen dat de transistor gaat geleiden. Aan de aanslag h vloeit dan de basisstroom $(U_B - U_{BE})/R1$. Aangezien deze iets minder bedraagt dan 40 µA zou er bij een stroomversterking van b.v. B = 500 een collectorstroom van ongeveer 20 mA kunnen vloeien. Op grond van $(U_B - U_F)/R2$ kan deze waarde echter niet meer bedragen dan een kleine 15 mA. In zo'n geval werkt de transistor vlak onder zijn *verzadiging*, zoals dat heet. Voor onze types met een klein vermogen moet je rekenen op een verzadigingsspanning van 0,2 tot 0,3 V. Dat is afhankelijk van basisstroom, collectorweerstand en werkspanning. Hoeveel de verzadigingsspanning precies bedraagt kun je aflezen aan de lijnen van de *karakteristieken* van de afzonderlijke types.

Tegenspraak

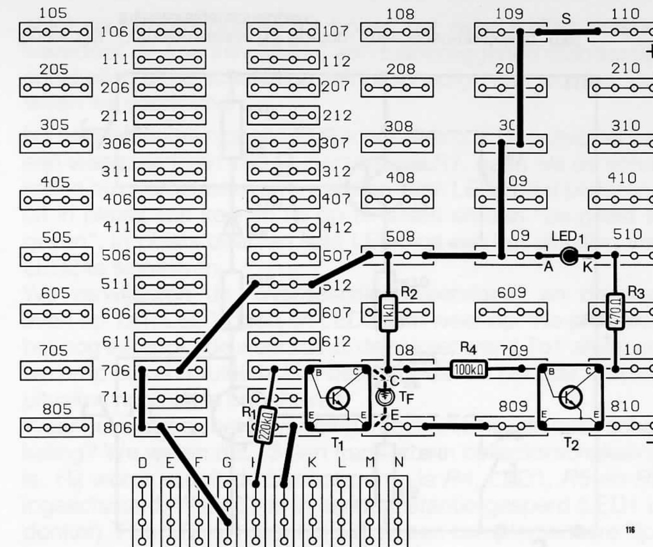
Collectorstroom, opgewekt door de basisstroom, zorgde ervoor dat de LED in figuur 113 oplichtte. In de ingangskring van figuur 115 treffen we dezelfde situatie aan als in figuur 113. De LED in de uitgangskring reageert echter precies "andersom".

76 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 115 en draaien aan de potmeter. En wat zien we? Als de loper beneden staat, geeft LED1 licht! Als we de loper opdraaien dooft LED1 langzaam.



Figuur 115. Het tegenovergestelde van figuur 113: als je de loper in de richting van n draait, licht LED1 steeds feller op.

Bij nader inzien hebben we twee invertoren achter elkaar geschakeld. Als de eerste begint te geleiden (potmeter langzaam opdraaien) onttrekt hij daardoor steeds meer basisstroom aan de tweede. Wat we in de digitale techniek dus hebben vermeden, dat gebeurt met de potmeter bewust: we "doorlopen" het gebied tussen niet-geleiden en volledig geleiden. In beide proeven reageert de lichtintensiteit van de licht-emitterende diode "op analoge wijze" op het draaien aan de potmeter. Alleen is het nu tegenovergesteld aan figuur 113. Ook in dit geval is schijnbare verkwisting vaak nuttig. Je kunt daarmee flexibel reageren op totaal verschillende ingangssignalen - steeds zul je de constellatie vinden die voor de verdere verwerking het gunstigste is. Om dit te demonstreren gaan we dadelijk nog twee proeven doen.



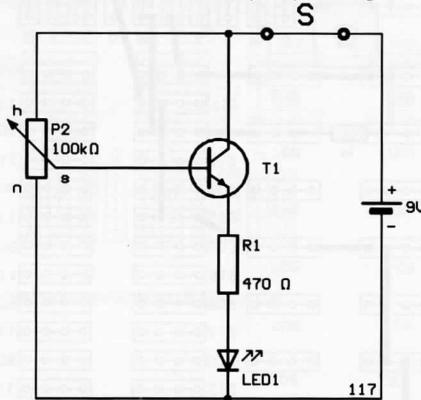
Figuur 116. Het opbouwschema bij figuur 115.

77 We vervangen T1 in figuur 113 door de fototransistor uit onze experimenteerdoos en letten op wat er met LED1 gebeurt. We zien dan: als er in onze omgeving niet al te veel licht is blijft de licht-emitterende diode donker. Dan brengen we langzaam een brandende zaklantaarn in de nabijheid van de fototransistor. We stellen vast: naarmate de lantaarn dichterbij komt, licht LED1 feller op.
De fototransistor heeft weliswaar geen basisaansluiting, maar licht heeft hetzelfde effect als de spanning aan de aftakking van onze potmeter: hoe meer licht erop valt, des te sterker geleidt de transistor.

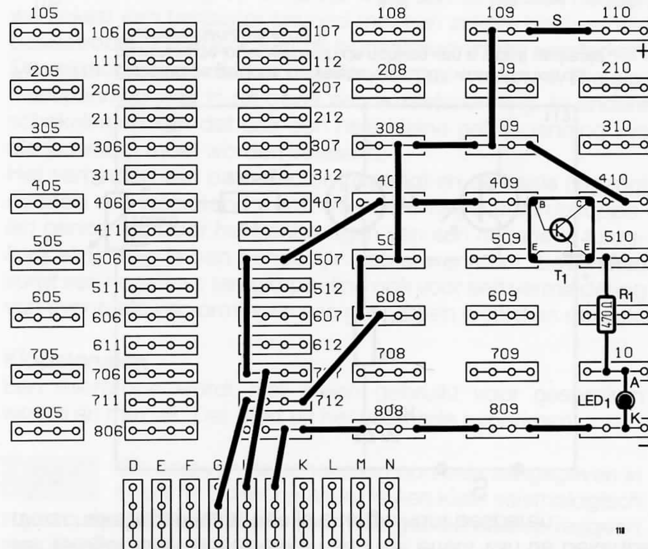
78 Dezelfde "vervanging" voeren we nu uit in figuur 115. Dan zoeken we weer een donker hoekje op. We zien dat LED1 fel licht uitstraalt. Dat verandert wanneer we de lichtstraal van de zaklantaarn op de fototransistor richten. Hoe dichterbij de lantaarn, des te donkerder de licht-emitterende diode.
Onze conclusie luidt:
- de effectieve richting in figuur 115 is omgekeerd aan die van figuur 113, want er zijn twee emittertrappen achter elkaar geschakeld;
- de lichtgevoeligheid is in figuur 115 duidelijk groter dan in figuur 113, want er zijn twee versterkertrappen achter elkaar geschakeld.

Een weerstand minder

Bij de schakelingen die we zojuist onder de loep hebben genomen functioneert de emitter als gemeenschappelijke elektrode voor de ingangs- en uitgangskring. Om het basistraject te beveiligen tegen te hoge stroom heb je een weerstand nodig voor de stroombegrenzing. Die kun je je bij de collectorschakeling zoals aangegeven in figuur 117 besparen. Althans, als je de collector precies zo hebt aangesloten als het hoort. In een collectorschakeling beveiligen onze transistoren zichzelf tegen een te hoge basisstroom: hun collectorverzadigingsspanning is lager dan de basis-emitterdrempelspanning.



Figuur 117. Collectorschakeling, ook wel emittervolger genoemd: LED1 licht pas bij een hogere instelling van P2 geleidelijk op.



Figuur 118. Het opbouwschema bij figuur 117.

79 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 117 en draaien de potmeter weer langzaam op van n naar h. Dan zien we: nu licht LED pas op, wanneer de loper van de potentiometer is aangekomen bij een spanning van U_{BE} + U_F. De schakeling heeft dus aanzienlijk meer ingangsspanning nodig om de LED te laten oplichten. En ze reageert ook in ieder opzicht totaal anders. Maar dat hebben we hierboven (en bij de Darlington-schakeling) al besproken. Hoe dat functioneert vanuit de optiek van de analoge techniek blijkt uit de volgende insider-info.

Insider-info 12

We hebben al even kennis gemaakt met de collectorschakeling in hoofdstuk 9. Deze keer is het ons weer te doen om de reactie in de "actieve zone", dus in het gebied tussen Ja en Nee.

Ten eerste: de uitgang van deze trap is de emitter. De spanning die aan de belastingsweerstand (incl. LED) optreedt, is gelijk aan de ingangsspanning verminderd met de waarde U_{BE}. Vanuit het oogpunt van de digitale techniek leidt "Ja" aan de ingang ook tot "Ja" aan de uitgang. In de analoge techniek en dus ook met betrekking tot wisselspanningsmodulatie noemt men dit het *in fase* zijn van de signalen aan de in- en de uitgang, terwijl ze bij de emitterschakeling onderling in tegenfase (180° verdraaid) optreden. En - ze worden wat hun spanning betreft niet versterkt. Vandaar de benaming "één-versterker" (Engels: "unity amplifier") die hiervoor ook wel wordt gebruikt. De collectorschakeling, ook wel emittervolger genoemd, heeft echter nog een belangrijke eigenschap: de ingang ervan is hoogohmig. Dat hadden we ook al in hoofdstuk 9 vastgesteld.

Je kunt dat het beste begrijpen als je het als volgt bekijkt: de emitterstroom (de som van basis- en collectorstroom, die dus ongeveer overeenkomt met de collectorstroom) bereken je met toereikende nauwkeurigheid aan de hand van de formule

$I_E = I_B \times B$. I_B wordt door de ingangsspanning U_{in} "op gang gebracht": $U_{in} = U_{BE} + I_E \times R_E + U_{BE} + B \times I_B \times R_E$.

Als we U_{BE} ten opzichte van U_{in} verwaarlozen leidt dat tot een ingangsweerstand van ongeveer B x R_E.

Bij deze beschouwing komt LED1 in figuur 117 te vervallen! R_E komt overeen met $R1$.

11. Complementaire schakelingen

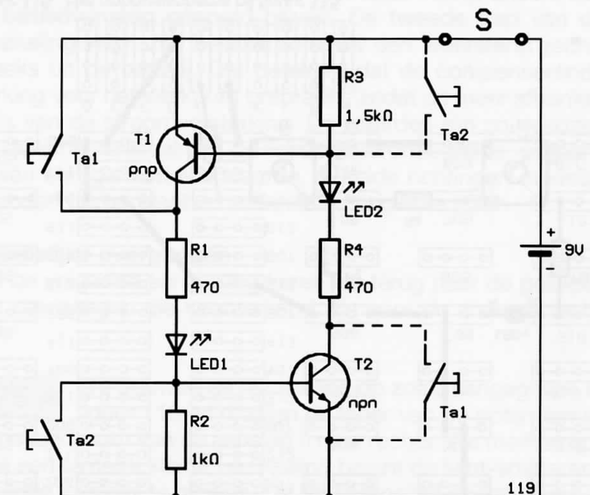
We hebben al gezien dat je niet eenvoudigweg van dé transistor kunt spreken. Aan welke transistoren men bij de toepassing de voorkeur gaf, was afhankelijk van de beste resultaten tijdens de produktie. Lange tijd werkte men in de theorie en de praktijk overwegend met npn-transistoren, dus transistoren met een positieve collector- en basisspanning, maar met een negatieve emitterspanning. Bij de zonevolgorde pnp is het net andersom. Transistoren met een dergelijke opbouw zijn een aanvulling op die van het npn-type - zij worden *complementaire* transistoren genoemd. Zodra men de beschikking had over series van elk van beide types met vergelijkbare eigenschappen werd het interessant om ze met elkaar te gaan verbinden. Daarbij beperkte men zich niet alleen tot de traditionele schakelingen, maar kon men ook speciale structuren nabootsen die o.a. toegepast worden in *vierlagendiodes*, *thyristoren* en *triacs*. Verder is het natuurlijk ook afhankelijk van de benaderingswijze en van de precieze kennis van deze mechanismen, hoe een dergelijke schakeling moet worden beschreven. En deze schakelingen zijn ook weer doorgedrongen in menig toepassingsgebied van de elektronische schakeltechniek.

In onze experimenteerdoos zit een dergelijke pnp-transistor. Laten we met behulp daarvan de wereld van de "complementaire schakelingen" eens gaan verkennen!

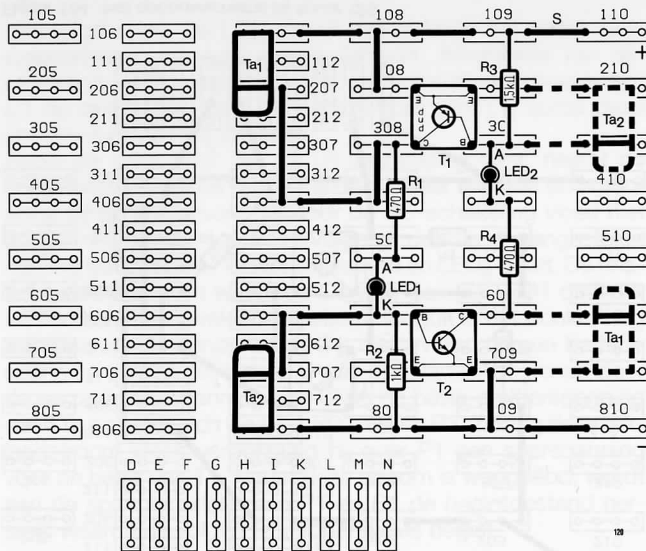
Complementaire RS flip-flop (thyristor-structuur)

Een *thyristor* is een halfgeleider-bouwelement, bestaande uit verscheidene n- en p-lagen, dat door een ontsteekpuls wordt ingeschakeld. Je kunt het pas dan weer uitschakelen als de stroom tot onder een bepaalde waarde is gedaald. Ook in de volgende schakeling werken verscheidene n- en p-lagen samen - in de vorm van de beide transistoren. En ze reageert ongeveer net zo als een dergelijke thyristor. Tegelijkertijd functioneert ze als flip-flop.

80 Voor een onderzoek van deze complementaire flipflop bouw je de schakeling op zoals aangegeven in figuur 119. Met behulp van de beide licht-emitterende diodes kunnen we vaststellen of en wanneer er in de beide takken van de schakeling stroom vloeit.



Figuur 119. Complementaire RS flip-flop: "meerlagen-opstelling" met thyristoreigenschappen.



Figuur 120. Het opbouwschema bij figuur 119.

We drukken dus op toets Ta2 en ... wat een teleurstelling: er gebeurt niets! Dan drukken we op Ta1 en zien: beide diodes stralen licht uit. We laten Ta1 los en stellen vast: de diodes blijven licht geven. Vervolgens proberen we het nog een keer met Ta2 en zien tot ons genoegen: 't is gelukt - er vloeit geen stroom meer, beide LED's zijn donker.

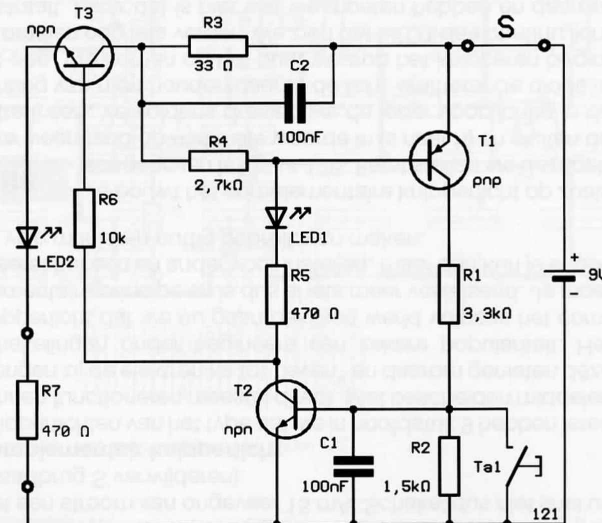
Als je figuur 119 nauwkeuriger bekijkt, zul je zien: de beide transistoren zijn kruislings met elkaar verbonden - de verbinding loopt telkens van de collector van de ene via LED en beveiligingsweerstand naar de basis van de andere. Met de bovenste toets Ta1 maken we de schakeling geleidend - we *setten* de schakeling. Door middel van de onderste toets Ta2 wordt de schakeling weer in de ruststand gebracht - de schakeling wordt *gereset*. Vandaar de naam *RS flip-flop*.

81 We verwisselen de toetsen "diagonaal": Ta2 wordt parallel geschakeld aan *R*3, Ta1 overbrugt de collector-emitterovergang van T2. Nu testen we het geheel opnieuw door op de toetsen te drukken. Het resultaat is: de schakeling functioneert zoals daarnet, alleen zit de S-toets nu aan de onderkant en de R-toets aan de bovenkant.

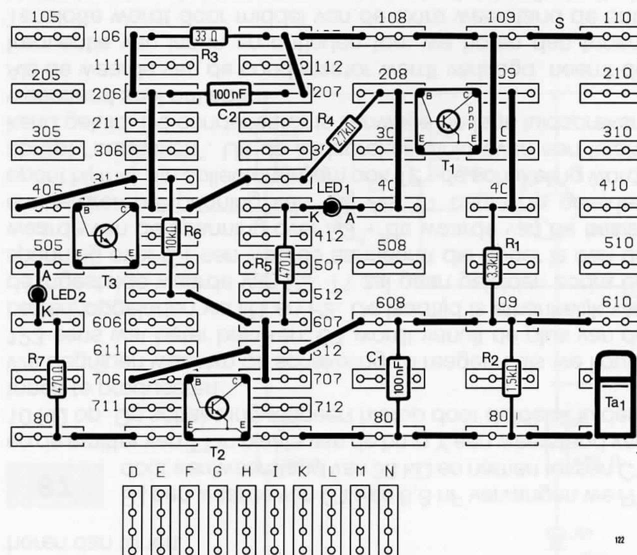
Elektronische overstroombeveiliging

Onze flip-flop heeft al menig bouwelement behoed tegen overbelasting. Hoe dat in z'n werk gaat laat de volgende proef zien.

82 Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 121 maken we zo'n reddende engel voor bouwelementen. De groene LED2 en haar beveiligingsweerstand stellen een elektronische schakeling voor waarin kortsluiting of gewoon een te hoge belasting kan ontstaan. In beide gevallen



Figuur 121. Redde al menig bouwelement: elektronische overstroombeveiliging met complementaire RS flip-flop.



Figuur 122. Het opbouwschema bij figuur 121.

stijgt de stroomopname tot boven het gebruikelijke niveau, waardoor de spanningsbron, een tussenliggende stabilisatieschakeling of de schakeling zelf beschadigd kan worden. Dat willen we voorkomen.

Na het inschakelen geeft LED2 licht - alles o.k. Door middel van een weerstand van 150 Ω, parallel aan *R*7, gaan we de schakeling nu overbelasten en we stellen vast: LED2 gaat plotseling uit in plaats van kort en fel op te flitsen en dan "de geest te geven". In plaats daarvan licht LED1 op om het uitvallen van LED2 te signaleren.

We verwijderen de "overbelastingsweerstand" en drukken even op Ta1: LED1 dooft en LED2 licht weer op. We proberen het nog eens met de weerstand: deze keer werkt Ta1 alleen als we erop blijven drukken. Dat betekent dat de oorzaak van het uitvallen nog niet is opgeheven.

Waar bevindt zich het beveiligingsmechanisme van deze schakeling? We weten dat T3 een transistor in collectorschakeling is. Hij wordt vanuit de basisstroom via *R*4, LED1, *R*5 en *R*6 ingeschakeld. Want T2 is in eerste instantie gesperd (LED1 is donker). T1 en T2 zijn geschakeld als een complementaire flipflop zoals aangegeven in figuur 119. Om ervoor te zorgen dat hij niet te snel reageert wordt zijn werking een beetje afgeremd door *C*1 en *C*2. Anders zou hij bij het inschakelen ongewenst in werking gesteld kunnen worden.

De beslissende factor voor de beveiliging is *R*3. Door deze weerstand vloeit de stroom waarvan de sterkte in de gaten moet worden gehouden. Bij 33 Ω volstaat ca. 15 mA om ervoor te zorgen dat T1 gaat geleiden, want de spanning over *R*3 functioneert als basis-emitterspanning. Als T1 begint te geleiden wordt ook T2 ingeschakeld en zet zodoende T1 met zijn collectorstroom helemaal open - het bekende flip-flopmechanisme. Je kunt pas resetten met Ta1 als de spanning over *R*3 wat is gedaald, m.a.w. als de te hoge stroom is verdwenen.

83 We verwijderen *C*1 en *C*2 uit de schakeling zoals aangegeven in figuur 121 en sluiten vervolgens de batterij aan. We stellen vast dat de zekering nu de neiging vertoont om bij het inschakelen te reageren.

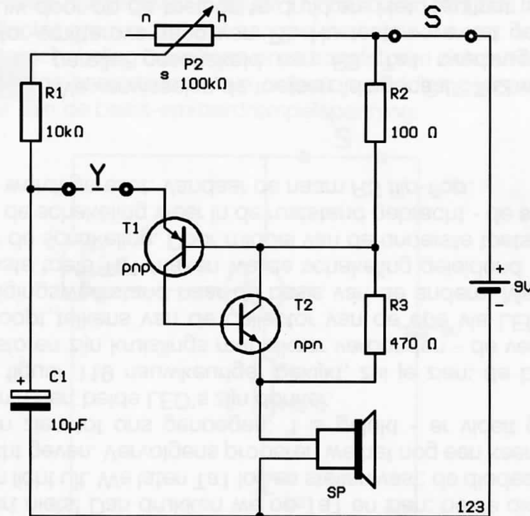
84 Nu steken we de condensatoren weer op hun plaats. Bovendien nemen we parallel aan *R*7 een elco van 10 µF op, met de plus-aansluiting in de richting van LED2. We merken op dat de zekering al reageert op de korte stroomstoot waarmee de condensator wordt opgeladen.

PUT-metronoom - een schakeling die "knak" zegt

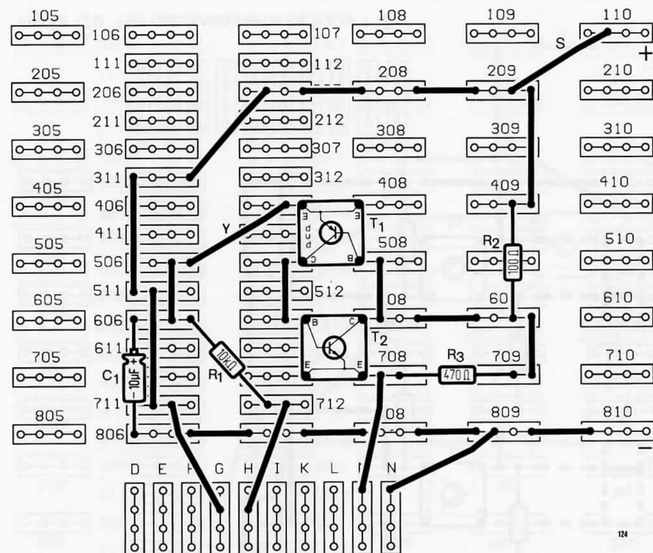
In deze schakeling, weergegeven in figuur 123, herkennen experts overeenkomsten met speciale, via de anode stuurbare thyristoren en *programmeerbare unijunction-transistoren (PUT's)*. Wij zijn meer geïnteresseerd in wat die schakeling kan.

85 De schakeling zoals aangegeven in figuur 123 heb je gauw opgebouwd. We horen korte, droge, knak

kende geluiden uit de luidspreker komen. We draaien aan P2 en merken op: hoe dichter de loper s bij de aanslag h komt, des te sneller wordt de opeenvolging van deze pulsen. Hun frequentie stijgt van ongeveer 0,5 Hz tot 5 Hz. Dat kan goede diensten bewijzen, bijv. voor een metronoom.



Figuur 123. Complementaire metronoom: doet denken aan een unijunction-transistor.



Figuur 124. Het opbouwschema bij figuur 123.

86 We vervangen *C*1 door een condensator met een kleinere capaciteit - eerst 100 nF, dan 6,8 nF - en horen dan tonen.

87 Bij een waarde van *C*1 van 6,8 nF vervangen we *R*1 door een weerstand van 33 kΩ en nemen tussen *C*1 en de emitter van T1 in plaats van de brug Y een weerstand van 10 kΩ op. De schakeling reageert hierop door duidelijk luidere tonen te produceren.

We begrijpen waarom de schakeling zo reageert als we figuur 123 eens wat beter bekijken: *C*1 wordt vanuit de plus van de batterij opgeladen via *R*1 en P2. De laadtijd is afhankelijk van de ingestelde waarde van P2. T1 zal gaan geleiden zodra de spanning over *C*1 een waarde aanneemt die hoger is dan de waarde van de spanning over *R*2 + de waarde van de basis-emitterdrempelspanning van T1. Als T1 begint te geleiden opent hij met zijn collectorstroom ook T2 - de schakeling wordt abrupt "ontstoken". Uit de luidspreker klinkt even een knakkend geluid. De condensator is vanwege de lage luidsprekerweerstand snel ontladen.

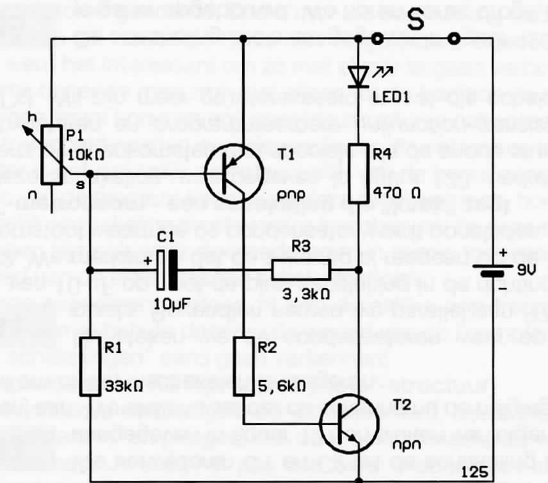
Als de waarde van de condensator wordt verlaagd, neemt de frequentie van laden en ontladen toe: we horen dan tonen. Tenslotte wordt door middel van de extra weerstand de ontlaadtijd verlengd. In plaats van in korte "pieken" vloeit de stroom nu gedurende langere tijd door de luidspreker.

Denk eraan dat de spanningsdeler de batterij continu belast met een stroom van ongeveer 15 mA! Schakel dus niet snel uit (draadbrug S verwijderen).

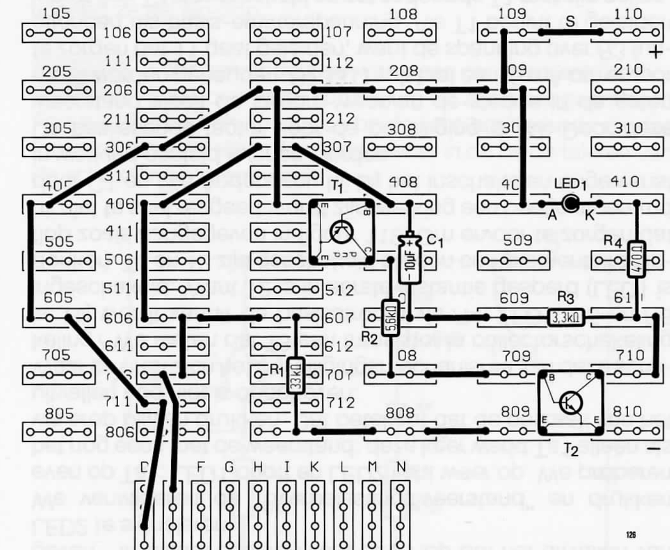
Complementair knipperlicht

Knipperlichten van het type dat we in hoofdstuk 9 hebben leren kennen functioneren meestal direct. Met bescheiden middelen brengen zij de elektronika tot "leven" en daarom genieten deze schakelingen onder beginners een zekere populariteit. Het knipperlicht dat we nu gaan bekijken werkt volgens het complementaire principe en is dus al iets meer veeleisend. Je moet er eerst het een en ander voor instellen, maar dan kun je er ook op vele manieren nuttig gebruik van maken.

88 Je bouwt het complementaire knipperlicht op zoals aangegeven in figuur 126. Eerst stellen we de regelbare weerstand op minimale waarde in (s naar h) en sluiten de batterij aan. Vervolgens draaien we de loper voorzichtig in de richting van n en houden daarbij de licht-emitterende diode in het oog. We komen op het punt waarop het knipperen begint en draaien nog iets verder. We zien dat LED1 dan continu licht uitstraalt. Maar dat is niet wat we moeten hebben en daarom draaien we een eindje terug totdat de diode netjes knippert. Hoe komt deze reactie tot stand? Vanuit de negatieve pool gezien krijgt T1 basis-emitterspanning via de spanningsdeler van *R*1 en P1. Al bij een geringe waarde van P1 wordt de basis-emitterdrempelspanning bereikt en begint T1 te geleiden. Als je nu verder opdraait blijft T1 de hele tijd geleiden en komt er



Figuur 125. Complementair knipperlicht met energiebesparingseffect: temperatuur- en spanningsafhankelijkheid kunnen zinvol worden gebruikt.



Figuur 126. Het opbouwschema bij figuur 125.

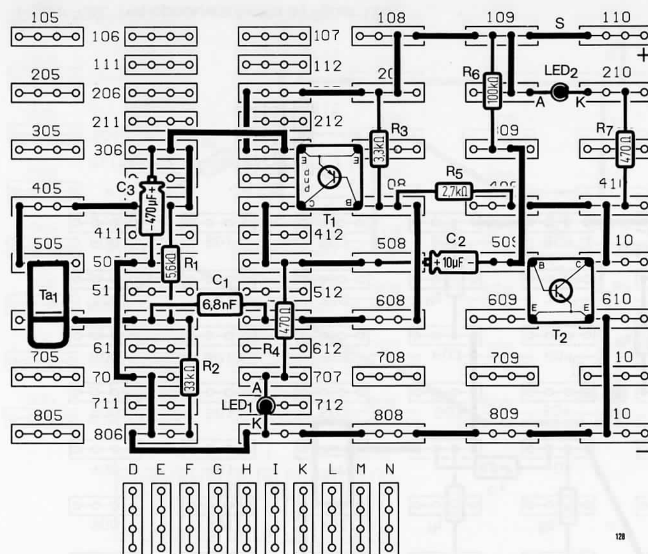
van knipperen niets terecht. Dus niet verder draaien dan tot het punt waar het knipperen net begint. Voor het overige zorgt de "dynamiek" van de schakeling. Want: T2 krijgt nu basisstroom via T1 en begint eveneens te geleiden. Zodoende ontstaat er zowel voor de *RC*-schakeling *R*3, *C*1 als voor LED1 een stroombaan naar de negatieve pool. Dankzij de stroom door de *RC*-schakeling gaat T1 sterker geleiden zodat T2 snel

verzadigd raakt. De LED straalt dus al korte tijd nadat ze is ingeschakeld, op volle sterkte licht uit. Afhankelijk van zijn capaciteit en de waarde van de voorschakelweerstand wordt *C*1 nu opgeladen door de basisstroom van T1, zodat deze stroom voortdurend afneemt.
Zodra dit ertoe leidt dat T2 uit verzadiging gaat, neemt de collectorspanning van deze transistor weer snel toe en draagt ertoe bij dat de stroom die door de *RC*-schakeling vloeit niet alleen nul wordt, maar vervolgens ook in tegengestelde richting gaat vloeien. T2 wordt gesperd en LED1 dooft. De relatief zwakke stroom waarmee *C*1 zich dan via LED1 ontlaadt veroorzaakt een zwak schijnsel dat hooguit in het donker nog zichtbaar is. De condensator *C*1, die tevoren bij een batterijspanning van 9 V tot bijna 8 V was opgeladen (begrensd door de verzadigingsspanning van T2 en de basis-emitterspanning van T1), ontlaadt zich via P1, LED1, *R*4 en *R*3. Zolang deze ontlaadstroom vloeit veroorzaakt hij over P1 een sperspanning voor de basis van T1. Nadat deze stroom is weggeëbd, wordt aan de spanningsdeler van P1 en *R*1 de begintoestand hersteld waarna de volgende knippercyclus begint.

89 We sluiten het knipperlicht eerst aan op een verse batterij en vervolgens op een batterij die al een poosje is gebruikt. Dan zie je het volgende: als je erin bent geslaagd om de schakeling met de ene batterij aan het knipperen te krijgen, zal je dat met de andere hoogstwaarschijnlijk niet lukken. Je moet de schakeling dan opnieuw instellen.
Dat betekent echter wel dat het functioneren van ons knipperlicht afhankelijk is van de batterijspanning! Dat mag op het eerste gezicht ongunstig lijken, maar een goede technicus is soms net als een invertor - hij verandert negatieve effecten in positieve.

90 Laten we het knipperlicht dan maar eens gewoon als spanningsindicator gebruiken! Je stelt P1 in op de spanningswaarde die moet worden bereikt. Als de spanning afneemt dooft het knipperlicht. Over de vraag hoe van dit “ontbreken” van het signaal gebruik kan worden gemaakt, moet je nog maar eens nadenken. (Suggesties vind je aan het eind van dit hoofdstukje.) Andersom kan de schakeling ook worden gebruikt om de lading van accumulatoren te controleren: als de diode knippert is de ingestelde laadspanning bereikt.

91 Als de knipperlichtschakeling juist is ingesteld gaan we één of beide transistoren verwarmen, bijvoorbeeld met een föhn. We stellen vast: ook de temperatuur is van invloed op het knipperen.
Dit effect wordt vooral veroorzaakt door de temperatuurafhankelijkheid van de basis-emitterspanning en de stroomversterking. Maar ook van deze nood kun je een deugd maken: bijvoorbeeld door de pnp-transistor op een bouwelement te plakken dat niet te warm mag worden. Als dat wel gebeurt gaat onze schakeling knipperen.



Figuur 128. Het opbouwschema bij figuur 127.

92 We vervangen *C*1 door een condensator van 6,8 nF en sluiten in plaats van LED1 de luidspreker uit onze experimenteerdoos aan.

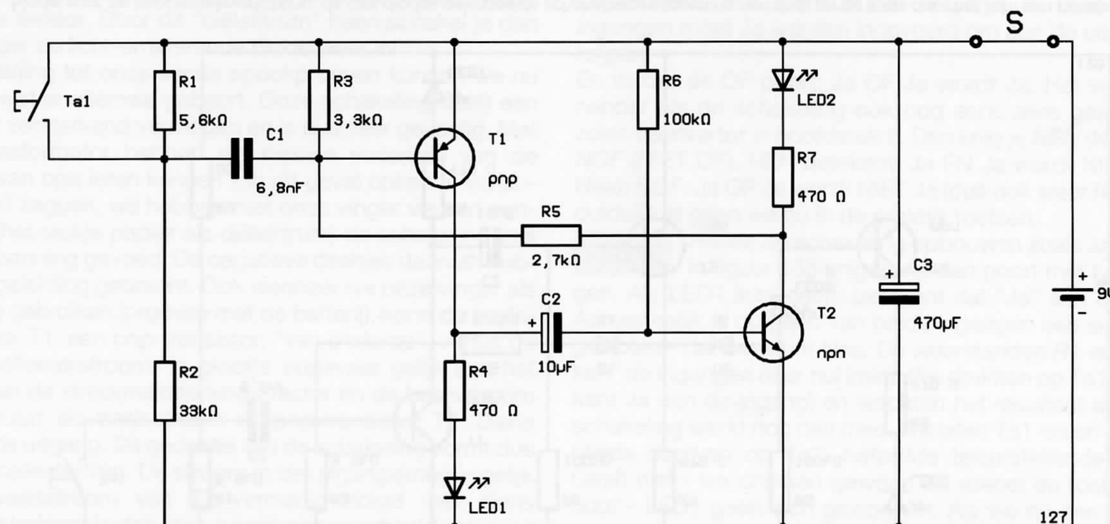
Vervolgens draaien we weer langzaam aan P1.
Wat er nu gebeurt had je eigenlijk wel kunnen verwachten: ons complementair knipperlicht is veranderd in een toonfrequentiegenerator. Dat biedt in de hierboven genoemde voorbeelden nieuwe mogelijkheden voor het vaststellen van spanning en temperatuur!

Monostabiel in complementair

Een monostabiele multivibrator is als het ware een astabiele multivibrator die niet helemaal is afgemaakt: als hij in werking wordt gesteld voert hij één trilling uit en daarna doet hij niets meer. Je kunt een dergelijke “monoflop” o.a. prima gebruiken als tijdschakelaar.

93 Nadat we de schakeling zoals aangegeven in figuur 127 hebben opgebouwd, sluiten we de batterij aan en stellen vast dat de beide licht-emitterende diodes continu licht geven. Dan drukken we op toets Ta1. We zien dat de beide diodes even doven, maar daarna weer oplichten. De schakeling reageert dus inderdaad als een monoflop.
Je kunt net zo lang op de toets blijven drukken als je wilt, zonder dat dat enige invloed heeft op de tijd dat de diodes donker blijven. Dat komt door de dynamische aansluiting via de condensator *C*1. We hebben deze truc al in hoofdstuk 9 leren kennen.

94 We verhogen de waarde van *C*2 van 10 µF via 100 µF tot 470 µF. We zien dat de tijd waarin de diodes geen licht uitstralen, toeneemt evenredig aan de waarde van *C*2 - van ongeveer 1 s tot ca. 50 s.



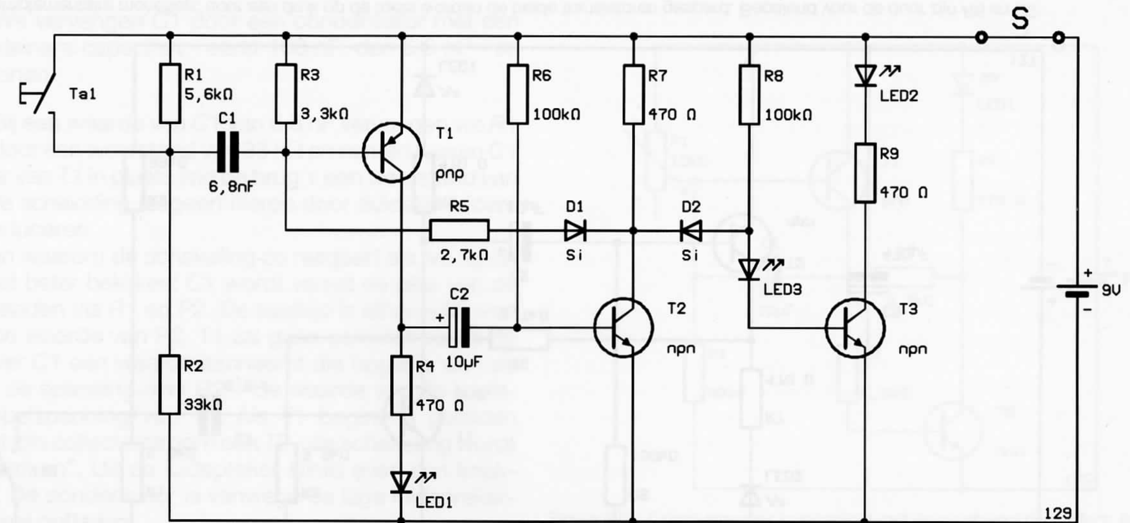
Figuur 127. Complementaire monoflop: door een druk op de toets worden de beide transistoren gesperd. Bepalend voor de duur zijn *R*6 en *C*2.

Laten we de werking van deze schakeling eens onderzoeken. De licht-emitterende diodes geven de toestand aan. In ruststand geven ze alle twee licht, want T2 is door de op de plus aangesloten batterijweerstand *R6* voldoende in geleiding. Op die manier krijgt ook T1 voldoende basisstroom waardoor LED1 in diens collectorkring oplicht. In de schakeling zit een soort "ontsteking" in de vorm van de condensator *C1* aan de basis van T1. Deze condensator is bij een batterijspanning van 9 V tot ongeveer 1 V opgeladen. Wanneer op de toets wordt gedrukt, bereikt deze spanning als tijdelijke sperspanning de basis van T1. De positief geladen kant van *C2* voor de basis van T2 wordt daardoor gescheiden van de plus en is dan opeens in serie met LED1 en *R4* als "sperbatterij" aangesloten op de basis-emitterovergang van T2. Het ontladen van *C2* duurt aanzienlijk langer. Aanvankelijk is *C2* tot ongeveer 8 V opgeladen. LED1 zorgt ervoor dat de voor de basis-emitterovergang effectieve sperspanning afneemt tot de net nog toelaatbare waarde van 6 V (richtcijfer). Terwijl de werking van de "ontsteking" aan T1 nu allang is weggeëbd, blijft T2 vanwege de aanzienlijk tragere ladingscompensatie voorlopig nog gesperd, zodat ook T1 nog niet opnieuw kan gaan geleiden. Via de op de plus aangesloten basisweerstand van T2 (100 kΩ) laat een zwakke stroom de sperspanning over T2 langzaam afvloeien. Zodra de positieve waarde van 0,6 V is bereikt begint T2 weer te geleiden. Daardoor geleidt ook T1 wat op zijn beurt tot gevolg heeft dat T2 snel wordt ingeschakeld - de wachtstand is hersteld en de beide diodes geven licht.

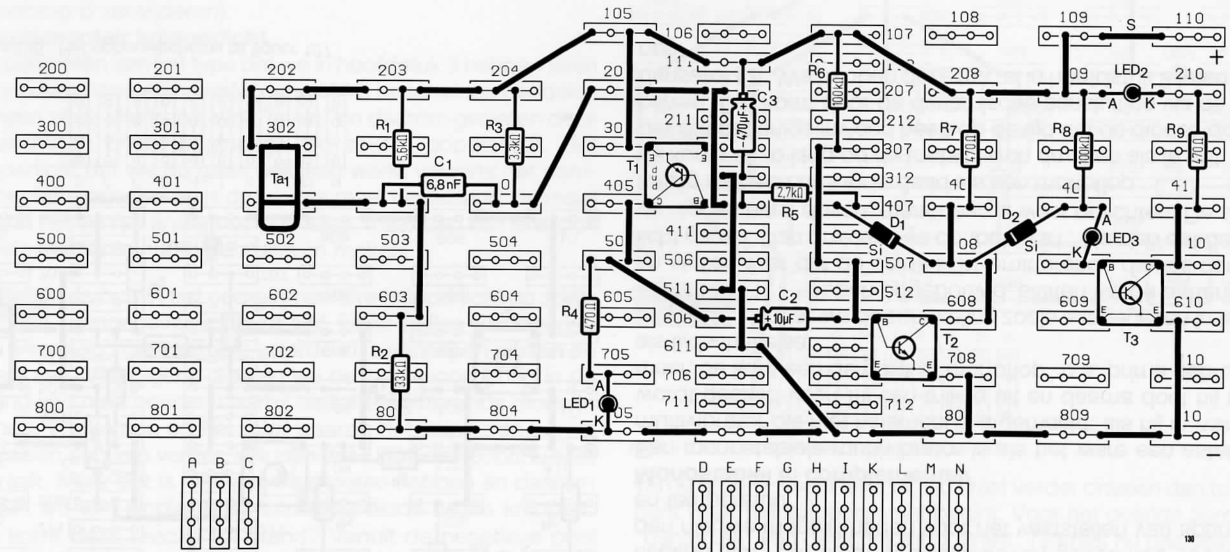
95 Als we de schakeling uitbreiden met de transistor T3 zoals aangegeven in figuur 129 krijgen we een stroomkring die al meer geschikt is voor praktische toepassingen. Als je nu op de toets Ta1 drukt, geeft LED2 gedurende de "monoflop-tijd" licht, terwijl LED2 als "stand by-indicator" dan donker is.

De schakeling zoals aangegeven in figuur 129 is bedoeld als tip voor insiders. We geven hierbij de volgende verklaring: met behulp van D1, D2 en LED3 worden de extra trap en de monoflop ontkoppeld. Zonder deze drie bouwelementen zou T1 via de basis-emitterovergang van T3 in geleiding blijven. Zoals je ziet kan ook door middel van een licht-emitterende diode worden ontkoppeld. Ondanks de diodespanning van D2 wordt de extra transistor dan veilig gesperd door T2. De extra transistor functioneert als invertor. Daardoor geeft LED2 alleen in de monoflop-tijd licht.

Deze schakeling is niet helemaal onproblematisch. Opnieuw voor de insiders: in schakelingen met meer dan één transistor kunnen zich gemakkelijk zelfbekrachtigingsverschijnselen voordoen. In dit geval verandert de monoflop dan in een astabiele multivibrator - hij flikkert of knippert aan één stuk door! Dit wordt veroorzaakt door de verbinding van in- en uitgang via de inwendige weerstand van de batterij. Gebruik daarom voor deze proef verse batterijen of de KOSMOS-nettransformator X!



Figuur 129. Model voor de trappenhuisverlichting: de met diodes gekoppelde schakeltrap reageert na een druk op de toets door het licht een poosje te laten branden.

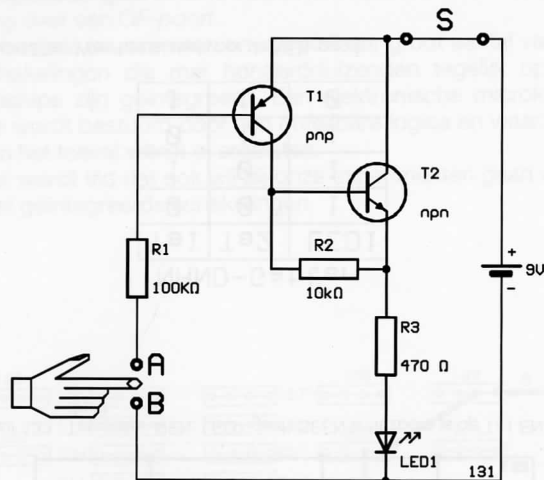


Figuur 130. Het opbouwschema bij figuur 129.

pnp-Darlington

Een Darlington-schakeling bestaande uit twee npn-transistoren hebben we al in hoofdstuk 8 leren kennen. Het principe "B1 x B2 = B_{tot}" functioneert zowel bij npn- als bij pnp-transistoren en zelfs in complementair verband. Je moet wel telkens goed op de juiste polariteit van de batterij letten. Dat wil zeggen: plus aansluiten op de emitter bij pnp en op de collector bij npn (figuur 131).

96 De volgens de aanwijzingen in figuur 132 opgebouwde schakeling levert het bewijs. Vorm met het topje van je vinger (mag best droog zijn!) een hoogohmige verbinding tussen *R*1 (A, klemveer 406) en min (B, klemveer 506). De licht-emitterende diode laat zien dat er nu stroom vloeit. Als je je vinger terugtrekt dooft de diode. De ingang van *R*1 functioneert als sensor.

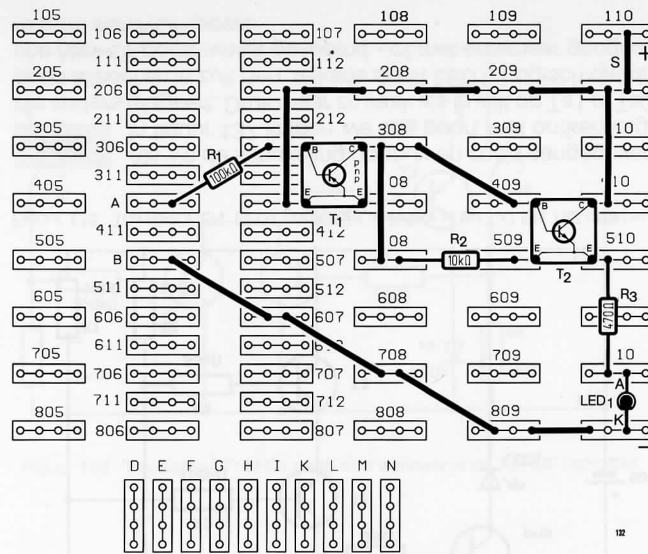


Figuur 131. Complementaire Darlington-schakeling: bijna té gevoelig.

97 Nu vervangen we *R*1 door de weerstand van 1,5 MΩ uit de experimenteerdoos. Als we de test herhalen blijkt: het functioneert nog steeds. Zelfs als we alle weerstanden uit onze doos achter elkaar schakelen kunnen we er met onze vinger voor zorgen dat LED1 licht geeft.

98 Als je de beschikking hebt over de KOSMOS-nettransformator X gebruik je die nu ter vervanging van de batterij. (Let op de juiste polariteit: rood is plus!) Herhaal de proef met je vinger en je zult zien dat het nu al voldoende is als je alleen maar de kant van *R*1 aanraakt!

99 We verwijderen de weerstand *R*2 en sluiten op *R*1 de "antenne" aan die we hebben gebruikt bij onze



Figuur 132. Het opbouwschema bij figuur 131.

spookproeven. Als je een door wrijven opgeladen lineaal dicht bij de antenne houdt, flikkert LED1. De schakeling reageert nu dus ook op elektrische velden.

100 Vervang nu de batterij die je in de vorige proef hebt gebruikt weer door de nettransformator - als je die hebt. Leg vervolgens een stukje papier of ander isolatie-materiaal op de sensor. Door dit "diëlektrum" heen schakel je dan met je vinger de licht-emitterende diode weer in!

In tegenstelling tot onze eerste spookproeven kunnen we nu verklaren wat er allemaal gebeurt. Onze schakeling heeft een zeer groot versterkend vermogen en is dus zeer gevoelig. Met de nettransformator hebben we nieuwe varianten van de bromtest van opa leren kennen - in dit geval optische varianten. Dat wil zeggen, we hebben met onze vinger via een condensator (het stukje papier als diëlektrum) de schakeling met netbromspanning gevoed. De negatieve deeltjes daarvan hebben T1 in geleiding gebracht. Ook wanneer we onze vinger als verbinding gebruiken (proeven met de batterij), komt de basisstroom voor T1, een pnp-transistor, "van onderop", vanuit de min. De collectorstroom, in grootte ongeveer gelijk aan het produkt van de stroomversterkings-factor en de basisstroom van T1, stuurt als basisstroom de pnp-transistor T2. Diens emitter is de uitgang. Dit gedeelte van de schakeling vormt dus weer een collectortrap. De stroom in de uitgangskring is gelijk aan de basisstroom van T2 vermenigvuldigd met diens stroomversterkingsfactor. We geven een voorbeeld en gaan uit van B1 = B2 = 400: om een uitgangsstroom van 16 mA te verkrijgen heb je, omdat B_{tot} = 160.000, niet meer dan 0,1 µA basisstroom nodig voor T1! De manier waarop de schakeling nu reageert is echter voor veel toepassingen te gevoelig. Vandaar de weerstand van 10 kΩ parallel aan de basis-emittero-vergang van T2. Die weerstand zorgt ervoor dat stroom tot 60 µA om T2 heen wordt geleid voordat deze begint te geleiden.

12. Transistorlogica

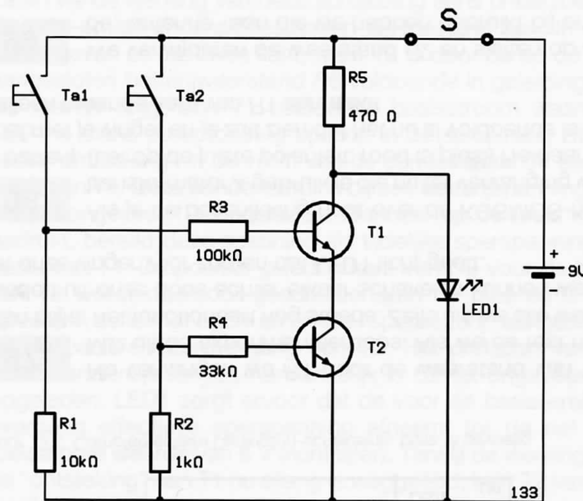
Digitale technieken en computers bestonden al voordat de eerste geïntegreerde schakeling werd uitgevonden. (In het begin werkten rekenmachines zelfs nog met relais.) Om vertrouwd te raken met de tweewaardige, binaire logica kunnen we dan ook gebruik maken van eenvoudige transistorschakelingen. En menig klein probleem kunnen we ook tegenwoordig nog oplossen met een dergelijke schakeling. In hoofdstuk 8 hebben we al de invertor leren kennen en in hoofdstuk 9 hebben we nog meer primaire schakelingen van de digitale techniek behandeld.

Met de logische regels die aan de werking van computers ten grondslag liggen moet je je eerst vertrouwd maken. In een dergelijk wonder van gegevensverwerking worden tweewaardige signalen verwerkt. Daarvoor heb je zogenaamde *poorten* nodig, die "Ja" danwel "Nee" aan de ingang ondubbelzinnig beantwoorden met "Ja" of "Nee" aan de uitgang. We kiezen voor de invoer "Ja" het indrukken van een toets waarmee de betreffende ingang wordt aangesloten op de plus-pool. Aan de uitgang moet dan een licht-emitterende diode oplichten bij "Ja". De signalen worden op meerdere ingangen aangesloten. Het resultaat verschijnt aan de uitgang. Hoe dat eruit ziet is afhankelijk van het soort poort dat wordt gebruikt.

Zo heb je de *EN*-poort: Ja EN Ja wordt Ja. Dus: aan beide ingangen moet Ja worden ingevoerd om aan de uitgang Ja te krijgen.

En verder de *OF*-poort: Ja OF Ja wordt Ja. Het wordt spannender als de schakeling ook nog eens alles gaat omkeren zoals de invertor in hoofdstuk 8. Dan krijg je *NEN* (NIET EN) en *NOF* (NIET OF). NEN betekent: Ja EN Ja wordt NIET Ja (dus Nee); NOF: Ja OF Ja wordt NIET Ja (dus ook weer Nee). Of dat duidelijk is gaan we nu in de praktijk toetsen.

101 Als we de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 133 krijgen we een poort met twee ingangen. Als LED1 licht geeft, betekent dat "Ja" aan de uitgang. Aanvankelijk is op geen van beide ingangen een signaal aangesloten - dat betekent Nee. De weerstanden *R*1 en *R*2 "trekken" de ingangen naar nul (min). We drukken op Ta1 (dat betekent Ja aan de ingang) en wachten het resultaat af. Maar de schakeling werkt nog niet mee. We laten Ta1 los en drukken in plaats daarvan op Ta2: hetzelfde teleurstellende resultaat. Geeft niet - we drukken gewoon op allebei de toetsen! En ja hoor - LED1 geeft zich gewonnen. Als we nu één van beide toetsen (om het even welke) of allebei de toetsen loslaten gaat de diode meteen weer aan.



Figuur 133. Transistor-NEN: LED1 geeft GEEN licht zodra je op Ta1 EN Ta2 drukt.

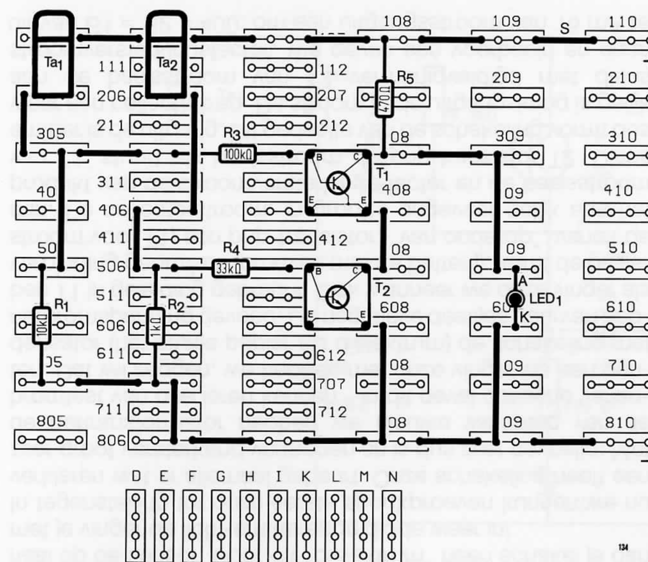
NAND-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

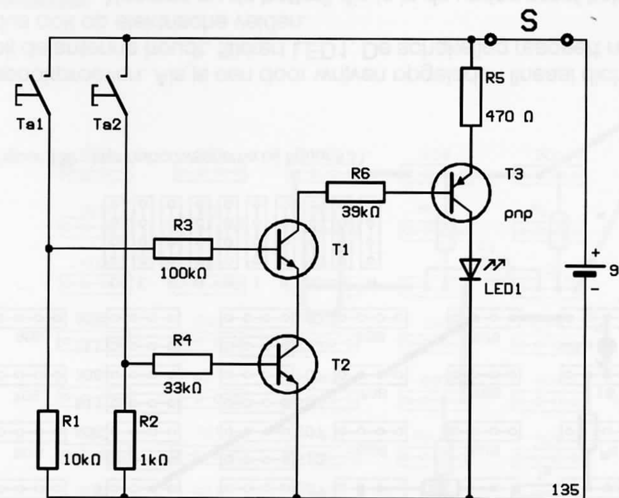
Figuur 133a. Waarheidstabel voor de NEN-poort.

Als we nu eens nadenken over de verschillende stappen in onze proef dan blijkt: alleen als op de bovenste en op de onderste ingang "Ja" (positieve spanning - vandaar dat dit ook wel *positieve logica* wordt genoemd) wordt aangesloten, antwoordt de schakeling met "Nee". (De uitgang schakelt van hoge spanning - LED geeft licht - naar lage spanning, d.w.z. LED dooft.) Aha. Dat is dus een NEN-schakeling in transistortechniek.

102 We breiden onze NEN-schakeling uit met de pnp-transistor zoals aangegeven in figuur 135. We stellen vast: nu is LED1 donker wanneer de toetsen niet geactiveerd zijn. We drukken eerst weer op één toets en daarna op allebei tegelijkertijd en zien: alles is net andersom als bij de vorige proef. Ja en Ja wordt Ja! Nu hebben we dus een *EN-poort* met twee ingangen gebouwd.



Figuur 134. Het opbouwschema bij figuur 133.



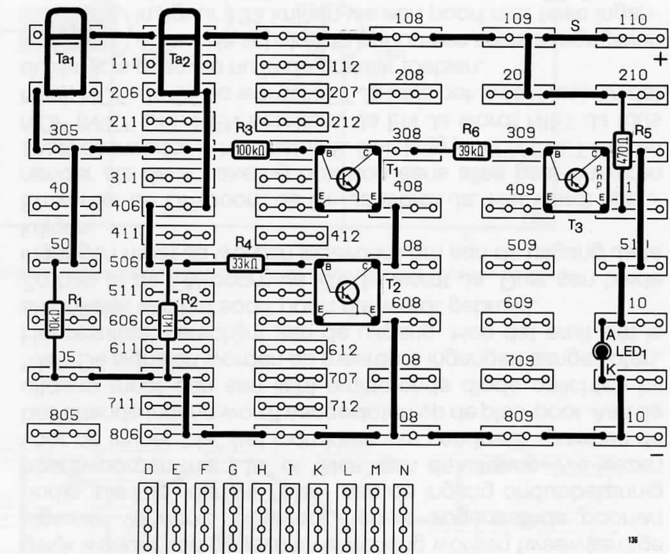
Figuur 135. Transistor-EN: LED1 geeft licht wanneer je op Ta1 EN Ta2 drukt.

103 Als we de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 137 krijgen we een poort met ontkenning, die anders reageert. Druk maar zo vaak als je wilt op Ta1 *of* Ta2 of op allebei en je zult zien: telkens dooft LED1. Logisch dat dit een *Niet-Of-poort* wordt genoemd - of met een meer gangbare term een *NOF-poort*.

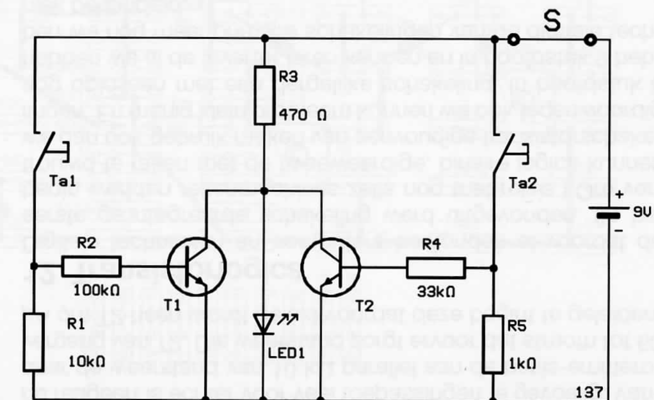
AND-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Figuur 135a. Waarheidstabel voor de EN-poort.



Figuur 136. Het opbouwschema bij figuur 135.



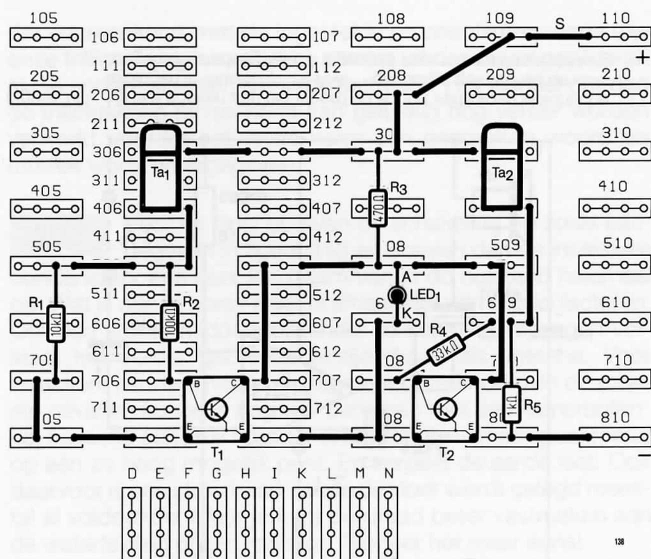
Figuur 137. Transistor-NOF: LED1 geeft GEEN licht als je op Ta1 OF Ta2 drukt.

NOR-Gatter

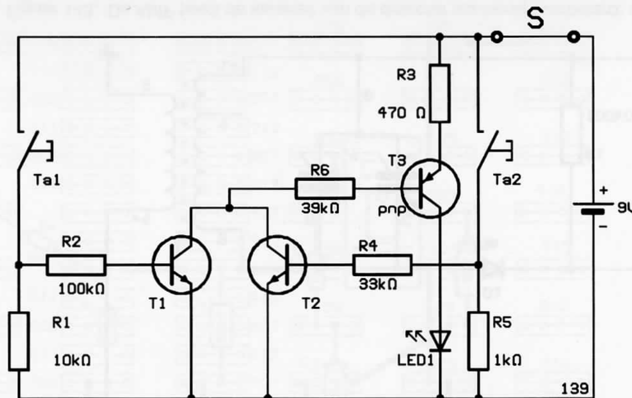
Ta1	Ta2	LED1
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Figuur 137a. Waarheidstabel voor de NOF-poort.

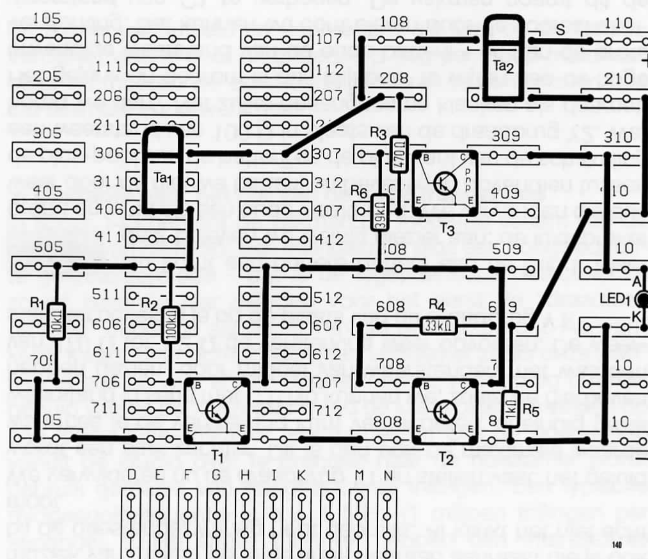
104 We breiden ook deze schakeling uit met onze pnp-transistor (figuur 139). Als je de batterij aansluit blijft LED1 aanvankelijk donker. Als je nu op Ta1 *of* Ta2 drukt of op allebei gaat de diode aan. Nu hebben we dus de beschikking over een *OF-poort*.
Er bestaat intussen een onvoorstelbaar groot aantal van deze schakelingen die met honderdduizenden tegelijk op siliciumchips zijn geïntegreerd. Een elektronische microkosmos die wordt bestuurd door een onfeilbare logica en waarin niets aan het toeval wordt overgelaten.
Het wordt tijd dat ook wij bij onze experimenten gaan werken met geïntegreerde schakelingen.



Figuur 138. Het opbouwschema bij figuur 137.



Figuur 139. Transistor-OF: LED1 geeft licht wanneer je op Ta1 OF Ta2 drukt.



Figuur 140. Het opbouwschema bij figuur 139.

OR-Gatter

Ta1	Ta2	LED1
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Figuur 139a. Waarheidstabel voor de OF-poort.

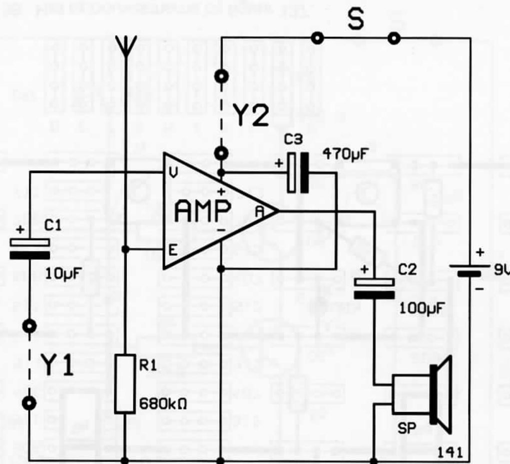
13. Van spanning naar vermogen: de AMP TBA 820

In onze experimenteerdoos zit ook een kleine krachtpatser - een geïntegreerd versterker-bouwelement waar je een luidspreker op aan kunt sluiten. Op de insteekbare module zitten nog een paar onderdelen die voor een goede werking ervan noodzakelijk zijn. Het geheel beschouwen we gezien vanuit de vijf stekerpootjes als een eenheid met een eigen symbool.

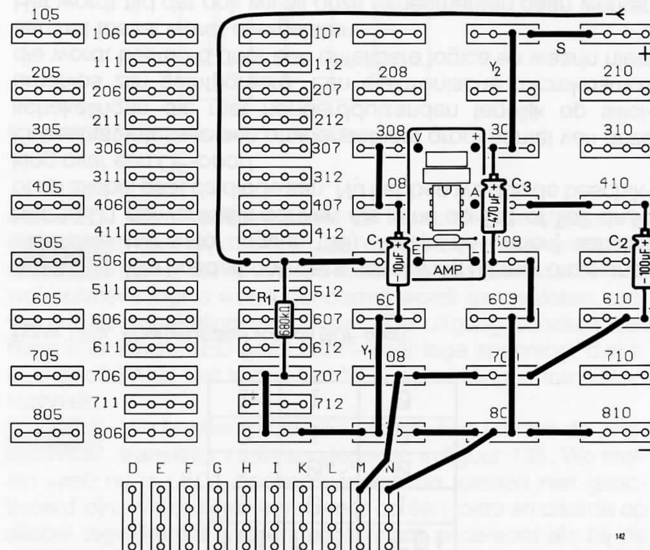
Versterkt alles wat je kunt horen

Het symbool voor een dergelijke versterker (in het Engels amplifier, vandaar AMP) is een driehoekje. Je komt het in allerlei schakelingen tegen. Links vinden we de ingangen, rechts de uitgang; aan de bovenkant de plus-, aan de onderkant de min-aansluiting voor de batterij. Maar waarom is er meer dan één ingang, vraag je je wellicht af. Waar dat goed voor is, daarover zullen we in het hoofdstuk over *operationele versterkers* meer te weten komen. Een speciale operationele versterker is ook onze AMP. Elk van zijn ingangen heeft een duidelijk omschreven eigen functie. *Wat* versterkt moet worden gaat naar ingang E. *Hoe groot* de versterking moet zijn bepalen we door het aansluiten van een externe schakeling op de ingang V. Deze speciale AMP is namelijk inwendig sterk tegengekoppeld. Dat vermindert de vervorming en houdt de versterking binnen redelijke grenzen. Daardoor kan de reactie van de versterker worden berekend.
De grootste versterking (die gepaard gaat met een aanzienlijk gekraak en geknetter in de luidspreker) krijg je als je de ingang V met wisselspanning via een elco rechtstreeks aansluit op de min-pool. Tot een waarde van ongeveer 470 Ω geldt dat je al naar gelang de waarde van de weerstand in serie met deze condensator bij een toename van *R* een afname van de versterking krijgt. Dus hoe kleiner *R*, des te meer wordt er versterkt en des te groter is de vervorming door de AMP. Probeer het zelf maar eens in de volgende proeven.

105 In het experiment zoals aangegeven in figuur 141 laat de AMP zien wat hij kan. Eerst met een nieuwe of nagenoeg nieuwe batterij. In de luidspreker hoor je allerlei merkwaardige geluiden: gefluit, gebrom, gekraak, kortom alles wat er aan storende elektrische velden in de omgeving hoor-



Figuur 141. Hij laat spoken aan het woord en spoort verborgen elektrische leidingen in muren op: de AMP - gevoelige geïntegreerde vermogensversterker met C1 ingesteld voor maximale versterking.



Figuur 142. Het opbouwschema bij figuur 141.

baar wordt. Daar kun je stemmen van spoken of bovenaardse muziek van maken als je de antennedraad aanraakt die je ook bij de geestenbezwering hebt gebruikt. Al klinkt het niet echt mooi.

We verwijderen nu *de draadbrug Y1* en stellen vast: het geluid wordt een stuk zachter. Dit is dan ook de maximale waarde waarmee je de versterking kunt verminderen: oneindig grote weerstand in serie met *C1*! Nu kunnen we, zoals we hierboven hebben gezien, door middel van weerstanden met waarden van 470 Ω tot 1,2 Ω de versterking weer opvoeren. De weerstanden bevestig je op de plaats van de draadbrug Y1.

106 Nu komt een oudere batterij aan de beurt. Maar daar beleven we weinig plezier aan: de luidspreker gromt en jankt als een oude waakhond. We vervangen die dus weer door de nieuwe batterij en bevestigen bovendien tussen de plus-pool van de batterij en de plus-kant van de schakeling een weerstand van 100 Ω in plaats van de draadbrug Y2. Wat horen we dan? Net zulke onaangename klanken als daarnet. Het gejank en gegrom is dus blijkbaar te wijten aan de hoge inwendige weerstand van de oude batterij - en aan de grote versterking. Dat kunnen we controleren door de voorschakelweerstand van *C1* te verhogen. De vakman noemt dit de zelfbekrachtiging van de versterker - hij oscilleert. Wat dat precies voor effect heeft is afhankelijk van de toestand van de batterij. Bij een nieuwe batterij en de kunstmatige inwendige weerstand van 100 Ω kan een condensator van 470 µF (die je in de doos vindt) nog uitkomst bieden, als je die rechtstreeks op de plus- en de min-pool van de AMP aansluit. En eventueel moet je ook de weerstand voor de aansluiting V verhogen. Met zulke problemen wordt een elektrotechnicus elke dag geconfronteerd.

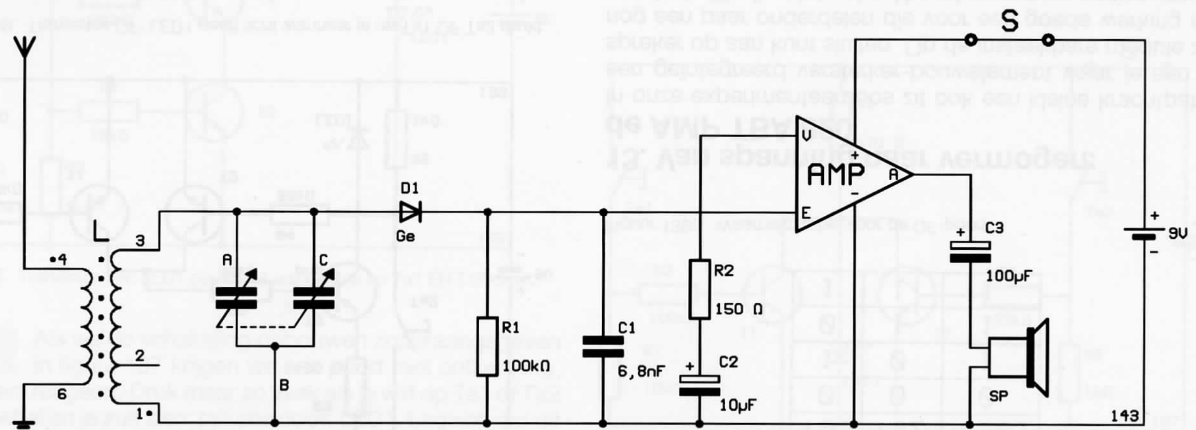
107 We stappen nu over op de KOSMOS-nettransformator als die tenminste voorhanden is. Dat spaart batterijen. Mogelijk dat de luidspreker dan eerst driftig begint te brommen. Dat herinnert ons aan de bromtest van opa - blijkbaar vangt de schakeling capacitief netbrom op. Om dat in de praktijk te voorkomen moet je het geheel *afschermen*, d.w.z. de schakeling in een metalen behuizing plaatsen - net zoals je dat met een autoradio doet.

We onthouden dus: zowel een te grote versterking als een te grote inwendige weerstand van de spanningsbron kan ertoe leiden dat iets niet zo functioneert als het theoretisch was gepland. De oplossing voor een dergelijk probleem: minder versterken, de inwendige weerstand - voor wisselspanning - verkleinen door een grote condensator toe te passen, de schakeling beveiligen tegen storende velden van buitenaf.

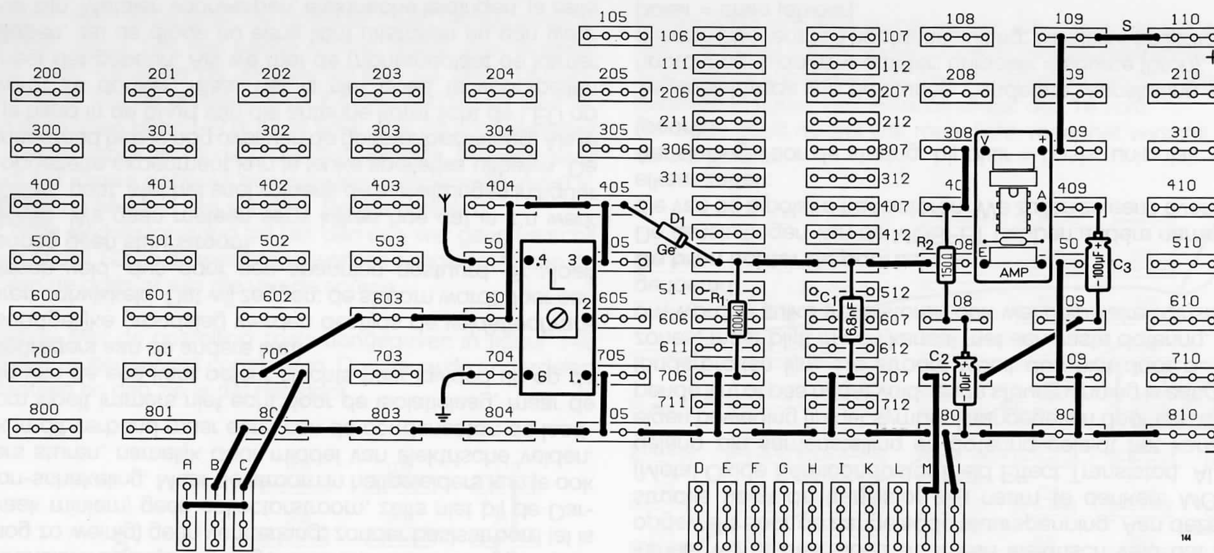
Gewenste tonen

Het is mogelijk om aan de ingang van een versterker de via de antenne opgevangen gewenste signalen van ongewenste te scheiden. Goudzoekers gebruiken een zeef: zand en water glippen erdoor, maar de grotere voorwerpen blijven erin achter. Die kunnen ze dan op hun gemak naar kleur sorteren.

Ook om naar de radio te kunnen luisteren heb je een zeef nodig. Die bestaat uit een spoel en een condensator en wordt *trillingskring* genoemd. Elke radiozender heeft een bepaalde frequentie. Als je die kent kun je de juiste waarden voor de spoel en de condensator berekenen. In de experimenteerdoos tref je een *middengolfmodule* (L-module) aan met een afgeschermde spoel en een passende *instelbare condensator.* Met deze condensator, parallel geschakeld aan de spoel, kun je op zoek gaan naar zenders. Wanneer de frequentie van een zen-



Figuur 143. De AMP heeft de kwaliteit van de detector aanzienlijk verbeterd: een eenvoudige radio met zenderafstemming.



Figuur 144. Het opbouwschema bij figuur 143.

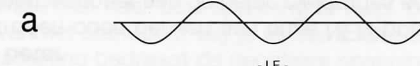
der overeenkomt met de ingestelde *resonantiefrequentie* van onze trillingskring, wordt deze zender uit de wirwar gepikt van al die andere signalen die in de lucht zijn. Het signaal dat dan de trillingskring binnenkomt kan gelukkig nog verder worden verwerkt voordat het in de vorm van gesproken woord en muziek wordt weergegeven.

108 Voor dit doel bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 143 en draaien dan de instelbare condensator een keer langzaam vanuit de nulstand helemaal op. Wat je dan te horen krijgt is afhankelijk van allerlei factoren. Om een sterke middengolfzender te kunnen ontvangen volstaat het eerder gebruikte eindje draad als antenne. Voor zwakkere zenders heb je al wat meer draad nodig. In de meeste gevallen kun je je nog wel behelpen met een *kamerantenne*: bevestig een stuk draad met een lengte van een paar meter op een zo hoog mogelijk punt. En vergeet de *aarde* niet. Ook daarvoor is een stuk draad dat op de vloer wordt gelegd meestal al voldoende. Maar je kunt de draad beter vastmaken aan de waterleiding of een radiator. Probeer het maar eens!
Met het opsporen van golven kun je trouwens wel een hele avond zoet zijn. Op geen ander terrein is er vroeger waarschijnlijk zoveel geknutseld en geprobeerd als juist op dit terrein. Verderop vind je over dit onderwerp nog een hoop materiaal! Maar nu moeten we eerst eens proberen te achterhalen hoe dat allemaal in z'n werk gaat.

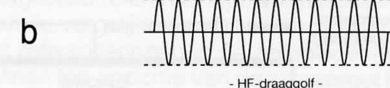
'n Uitstapje naar het rijk van de hoge frequenties
In figuur 143 herkent de vakman de moderne variant van de oervorm van de radio: een trillingskring plus een hoogfrequente gelijkrichterdiode - dat is de legendarische detector, die zowat zeventig jaar geleden voor het eerst de "draadloze omroep" onder de aandacht van het publiek bracht. Aanvankelijk kwam daar echter nog geen versterker zoals onze AMP aan te pas en was er een engelengeduld voor nodig om met behulp van de punt van een draad de juiste plaats te vinden op een loodsulfide-kristal of iets dergelijks. Om de boodschap vanuit de studio over te brengen naar de huiskamer wordt gebruik gemaakt van hoogfrequente trillingen. Een typische middengolffrequentie is b.v. 1 MHz (1 miljoen trillingen per seconde). Zulke snelle trillingen hebben een interessante eigenschap: de uit elektrische en magnetische veldlijnen bestaande wisselvelden zijn in staat zich los te maken van de metalen mast die zendantenne wordt genoemd. Vanuit deze mast planten zij zich voort in de vorm van cirkels, net zoals de golven die ontstaan wanneer je een steen in stilstaand water gooit. Dat gebeurt met de snelheid van het licht: 300.000 km per seconde. Tussen twee "golfbergen" van een dergelijke HF-trilling ligt dus bij 1 MHz een afstand van 300 m. Dat is de *golflengte,* die wordt aangeduid met de Griekse letter lambda. Om ervoor te zorgen dat er tijdens het zenden een goed rendement wordt behaald dient de zendmast al naargelang de golflengte eveneens een bepaalde lengte te hebben. Daarom zijn deze masten zo hoog.

Het geheim van de detector
Een miljoen trillingen per seconde, dat hoort niemand. Ons gehoor kan hooguit 16.000 Hz waarnemen. De hoogfrequente golven zijn dan ook slechts het transportmiddel om vanuit de draad in de vrije ruimte te komen. Van tevoren worden ze "geladen", gemoduleerd, met datgene wat wij kunnen horen.

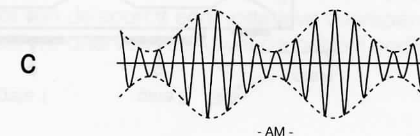
laagfrequente of LF-trilling die je kunt horen; a



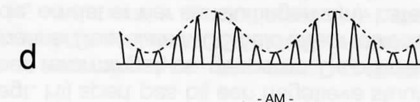
hoogfrequente of HF-trilling van de zender; b



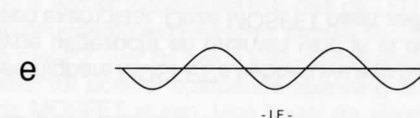
LF op HF overwint de ruimte; c



resultaat van de ontvangst achter de gelijkrichter; d



omhullende curve van de HF-trilling achter de gelijkrichter aan de condensator: herwonnen LF die je kunt horen. e



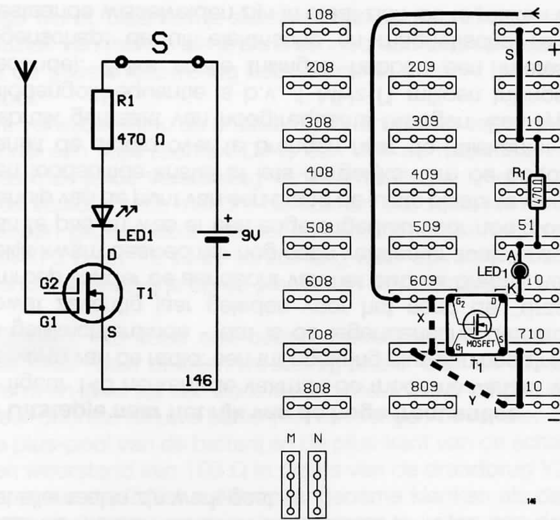
Figuur 145. Eerste les in radiotechniek.

Bij de korte, midden- en lange golf gebeurt dat door *amplitude-modulatie*, *AM*. Dat wil zeggen, de geluidstrillingen veranderen symmetrisch de trillingswijdte, dus de amplitude van de HF-trilling (zie figuur 145c).
De detector haalt de boodschap weer van de hoogfrequente *draaggolf*. De detector is een gelijkrichter, d.w.z. hij laat stroom maar in één richting door. In onze radio's splitst hij de symmetrische trilling op de nullijn in de lengterichting en levert dan halve golven af met geluidstrillingen "op hun rug". Nu moeten we nog van de HF-component zien af te komen en daar zorgt een condensator voor. Zijn lading volgt uitsluitend de piekwaarden van de HF-component en de "verbindingslijn" van deze piekwaarden is onze toonfrequentie (zie figuur 145e). Daar zat de AMP net op te wachten en, nadat hij deze signalen flink heeft versterkt, levert hij ze bij de luidspreker af. Die zet ze om in hoorbare geluidsgolven, dezelfde geluidsgolven die in de zender door de microfoon werden opgevangen. En dat gebeurt allemaal vrijwel op hetzelfde ogenblik waarop het geluid wordt geproduceerd. Per slot van rekening reist zo'n trilling met de snelheid van het licht.
In deze dienstverlenende functie zullen we de AMP nog vaker tegenkomen. Maar hij treedt ook zelfstandig op, want hij kan meer dan alleen maar ingangsspanningen versterken!

14. Een transistor van een andere soort: de MOSFET

Aan één ding hebben de elektronika-monteurs zich bij de bipolaire transistoren altijd al geërgerd: zonder stuurvermogen (al is het nog zo weinig) geen versterking; zonder basisstroom (al is die vaak miniem) geen collectorstroom, zelfs niet bij de Darlington-schakeling. Maar de stroom in halfgeleiders kun je ook anders sturen, namelijk door middel van elektrische velden. Denk in dit verband maar eens aan de condensator: de laadstroom vloeit immers niet echt door de isolatielaag, maar de lading van de ene kant oefent slechts haar invloed uit op de ladingdragers aan de andere kant.
Op soortgelijke grondslag werden destijds de *veldeffecttransistoren* ontwikkeld. Dat wil zeggen: de stroom wordt door een elektrisch veld, dus door een spanning gestuurd. Er vloeit nagenoeg geen stuurstroom.

109 We gaan meteen eens kijken hoe dat in z'n werk gaat. Met het snel volgens de aanwijzingen in figuur 146 opgezette experiment kun je leuke spelletjes uithalen. De antennedraad heb je nog over van de geestenbezwering. Als je met je hand in de buurt van die antenne komt licht de LED op of wordt ze donker. Maar het is niet goed te voorspellen wanneer dat gebeurt. Als we met de montageplaat de kamer rondlopen, zal de diode nu eens licht uitstralen en dan weer donker zijn. Metalen voorwerpen, elektrische leidingen, ja zelfs



Figuur 146. De stoorveld-indicator: chaotische aanwijzing, maar geen spoken.

onze dierbare huisgenoten zorgen enkel en alleen door hun aanwezigheid ervoor dat de LED oplicht of juist dooft. Een chaos van elektrische velden alom!

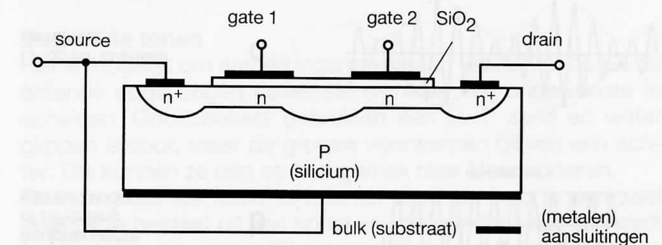
Op onze wonderbaarlijke transistor zit een metalen aansluiting voor de sturing, een *elektrode*. Deze is door siliciumoxyde geïsoleerd van een op de juiste wijze gedoteerd, geleidend *kanaal* in de halfgeleider. Het geleidend vermogen van dit kanaal wordt beïlnvloed door een elektrisch veld dat wordt opgewekt door de aangelegde stuurspanning. Aan deze constructie heeft de transistor zijn naam te danken: *MOSFET* (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor). Al naargelang zijn samenstelling en dotering geleidt het kanaal uit eigen beweging (in het symbool aangegeven door een doorlopende lijn) of pas nadat voldoende stuurspanning is aangelegd (onderbroken lijn). De stroom vloeit dus niet door p- en n-zones, maar blijft in een kanaal met een vaste dotering. Daarom worden zulke transistoren ook wel *unipolaire transistoren* genoemd.

De bron achter de poort...

De aansluitingen van de MOSFET hebben andere namen dan die van de bipolaire transistoren. We zullen ze eens even naast elkaar zetten:
Aansluiting voor de sturing: bipolair = basis; unipolair = *gate* (poort).

Tegenelektrode van de sturing, "onderste" aansluiting van de hoofdkring: bipolair = emitter; unipolair = *source* (bron); tweede ("bovenste") hoofdaansluiting: bipolair = collector; unipolair = *drain* (afvoer).

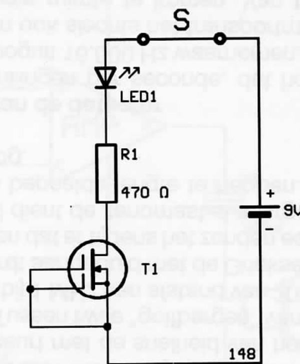
Je kunt het ook zo bekijken: emitter en source sturen de door de basis resp. poort gestuurde ladingdragers op pad, collector en drain verzamelen ze weer resp. laten ze "afvloeien" (drainage).
Uit het grote aantal verkrijgbare MOSFET's hebben we een bijzonder interessant type uitgezocht en daarvan vind je in de experimenteerdoos een exemplaar. Onze MOSFET heeft zelfs twee stuurelektrodes en geleidt ook nog als de gate-source-spanning 0 V bedraagt. Hij spert pas bij een negatieve stuurspanning. Dit wordt een *verarmingstype* genoemd. De officiële naam ervan luidt *n-channel Dual Gate MOS field effect tetrode, depletion type* (tetrode, omdat er vier aansluitingen zijn). Laten we hem voortaan maar gewoon "MOSFET" noemen. Figuur 147 laat het principe zien waarop de constructie van onze MOSFET berust.



Figuur 147. Dual gate-MOSFET: twee geïsoleerde stuurelektroden op een n-geleidend kanaal.

Dubbel gesperd is beter

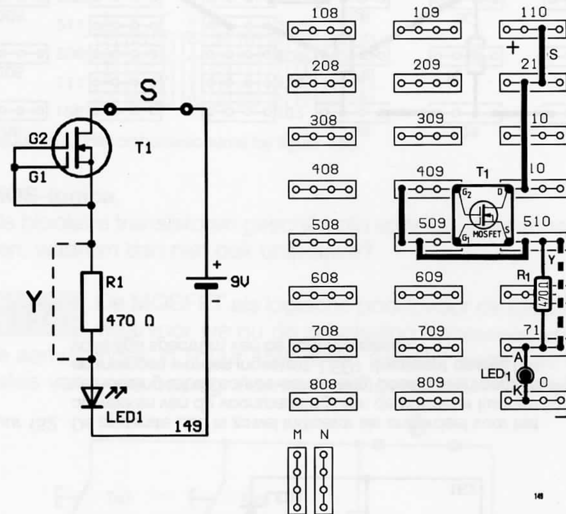
De beide stuurelektroden doen denken aan onze NEN-poort uit hoofdstuk 12: alleen wanneer aan de beide elektrodes een ten opzichte van de sperwaarde positieve spanning wordt aangelegd (Ja) is de hoofdstroomkring geleidend (uitgang is "geïnverteerd" Ja). We gaan dat eens wat nauwkeuriger bekijken. Wanneer geleidt de MOSFET en wanneer niet?



Figuur 148. Zelfgeleiding: de voorspanning van de gate bedraagt nul, maar desondanks geeft de LED licht, al is het maar zwak.

110 We veranderen de opbouw zoals aangegeven in figuur 146 een beetje en dan wordt alles duidelijk (figuur 148). Verwijder de antenne en sluit de beide poorten door middel van de bruggen X en Y direct aan op de source-aansluiting. Dan blijkt: LED1 geeft licht, al is de lichtintensiteit lang niet zo groot als bij de proef met antenne. In ieder geval geleidt het kanaal ondanks een gate-sourcespanning van 0 V. Zelfgeleiding bij wijze van spreken. Bewijs geleverd.
Voor deze bedrijfstoestand zal het dan ook wel geen verschil maken of de LED en de weerstand worden aangesloten aan de kant van de drain of aan die van de source.

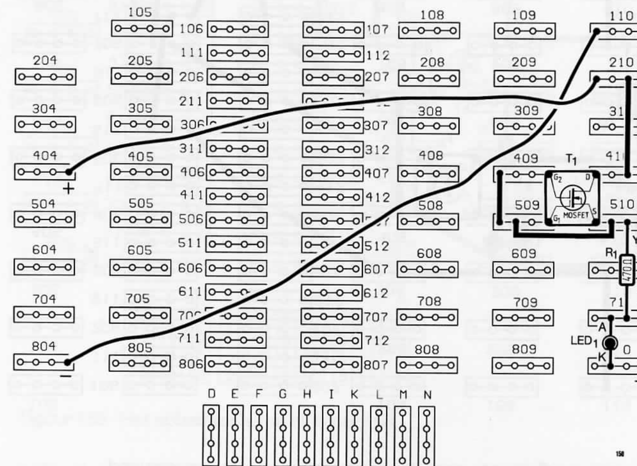
111 Met de opstelling zoals aangegeven in figuur 149 zullen we dat controleren. Dus gauw de onderdelen verplaatsen en dan zie je dat het klopt.



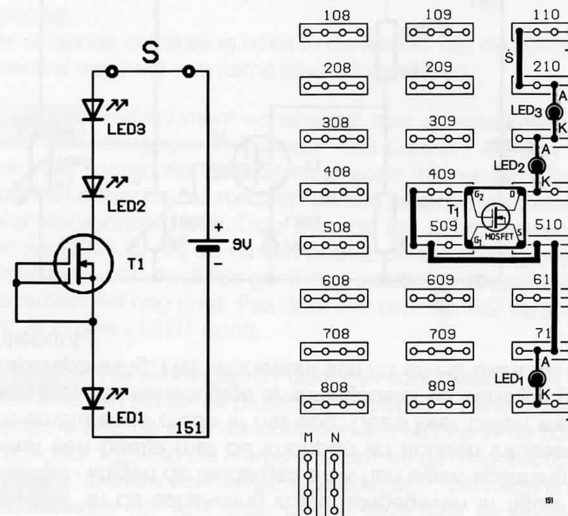
Figuur 149. In de drain- of in de sourcetak: bij deze gate-schakeling maakt het voor de MOSFET geen verschil waar LED en weerstand zijn opgenomen.

112 Omdat we helemaal niet bang zijn en bovendien toestemming hebben van de fabrikant, verwijderen we nu *R*1, bevestigen in plaats daarvan de brug Y en laten zodoende LED1 schijnbaar zonder enige beveiliging in de stroomkring achter. En het is nauwelijks te geloven, maar LED1 geeft nog steeds net zo weinig licht als voorheen. Voor alle zekerheid nemen we *R*1 opnieuw op in de schakeling en sluiten hem kort met de draadbrug Y. We vergelijken het resultaat met dat van de vorige schakeling en stellen vast: inderdaad, er is nagenoeg geen verschil.

En we gaan nog een stapje verder. Door een tweede batterij van 9 V in het linkerpaneel (of de KOSMOS-nettransformator X) in serie te schakelen met de eerste batterij van 9 V zoals aangegeven in figuur 150. Alles bij elkaar dus 18 volt!
De diode geeft nu wel wat meer licht, maar het verschil is niet verontrustend.



Figuur 150. Ook als de spanning wordt verdubbeld, blijft de stroom nagenoeg constant.



Figuur 151. Bij een constante stroom is er genoeg voor vele: alle LED's in de stroomkring stralen net zoveel licht als één alleen (test met overbrugging van de afzonderlijke licht-emitterende diodes!)

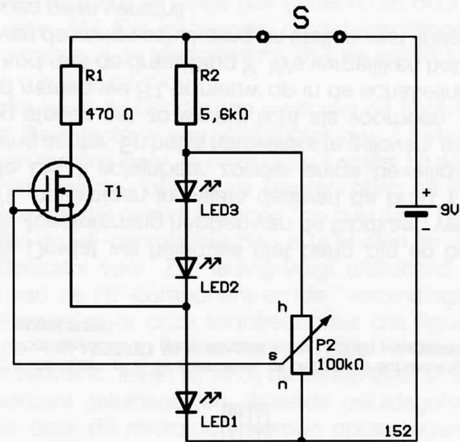
113 We verwijderen de tweede batterij en nemen de twee resterende licht-emitterende diodes op in de stroomkring (figuur 151). Met andere woorden, we verlagen de effectieve bedrijfsspanning met tweemaal de waarde van de drempelspanning. Maar zelfs daardoor verandert de lichtintensiteit van LED1 niet veel.
Laten we de resultaten kort samenvatten: bij een gate-spanning van 0 V geleidt de MOSFET niet alleen, hij controleert ook de stroom tamelijk nauwkeurig, ongeacht de hoogte van de bedrijfsspanning. En die stroom blijft zo gering dat er voor de licht-emitterende diode ook zonder beveiligingsweerstand geen gevaar dreigt. Een schakeling die zo reageert wordt *constante-stroombron* genoemd. Er bestaan daarvoor nog andere oplossingen, ook met bipolaire transistoren. Alles bij elkaar een prima hulpmiddel, bijvoorbeeld voor de besturing van lampen die zijn aangesloten op een sterk pulserende voedingsspanning!

Plus-min-swing aan de poort

Toch moet er een punt zijn waarop de MOSFET spert. En wel bij een negatieve gate-sourcespanning U_{GS}. Gelukkig is negatief een relatief begrip. De licht-emitterende diode komt ons op onbureaucratische wijze met haar LED-spanning te hulp. De rest is een kwestie van het standpunt dat je inneemt. Gezien vanuit de source-aansluiting bedraagt de negatieve spanning van de kathode van de LED bijna 2 V, dat is namelijk de waarde van de LED-spanning. Spanningen die worden gemeten ten opzichte van een vastgesteld referentiepunt worden *potentialen* genoemd. Dat kun je vergelijken met een landschap met bergen en dalen: het referentieniveau is de zeespiegel ("normaal nul"). Dalen kunnen ten opzichte van de zeespiegel best op een "negatieve hoogte" liggen.
Waar het eigenlijk op neerkomt: we kunnen de gates van onze MOSFET ten opzichte van de source een negatieve voorspanning geven zonder dat we daarvoor een tweede batterij nodig hebben.

114 We gaan dadelijk nog een stapje verder, bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 152 en testen ze uit. Als we P2 van n naar h draaien stellen we vast: LED1, die in het begin nog donker was, licht steeds helderder op. Al in de buurt van de aanslag h is de maximale lichtintensiteit bereikt.

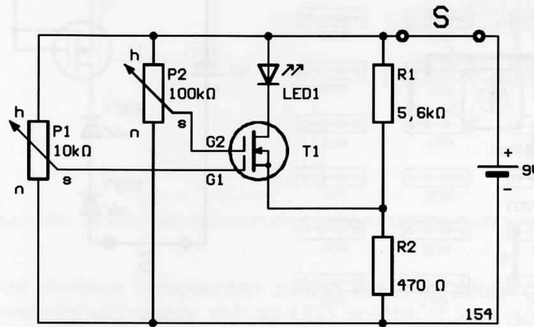
Bij deze proef heeft de al eerder toegepaste truc met de LED-spanning opnieuw zijn deugdelijkheid bewezen. Gezien vanuit de source kunnen we met P2 over de beide licht-emitterende diodes een van negatief tot positief oplopende spanning aftakken en daarmee de MOSFET sturen. Hoe hoger de stand van de loper, des te hoger de spanning en des te sterker de stroom, totdat deze door de beveiligingsweerstand wordt begrensd.



Figuur 152. De onderste LED is zowel indicator als onderdeel voor het opwekken van de voorspanning: aan de potmeter kunnen (in verhouding tot de source-aansluiting) positieve en negatieve gatespanningen worden ingesteld. LED1 doorloopt daarbij het volledige spectrum van de lichtintensiteit.

Ieder het zijne
Als er dan toch twee gates zijn moeten ze ook maar elk afzonderlijk aan hun trekken komen.

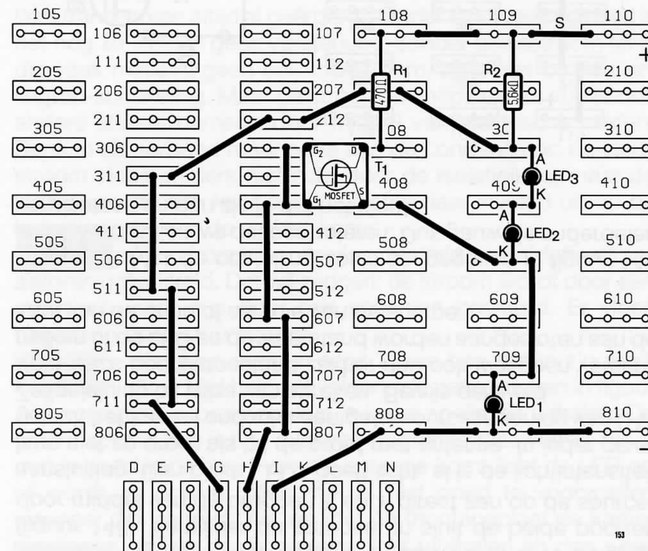
115 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 154 krijgen de beide gates elk hun eigen spanning. We spelen een beetje met de knoppen en houden intussen de licht-emitterende diode in het oog. Deze keer zullen we volstaan met een eenvoudige spanningsdeler ter verkrijging van de sperspanning. Het knooppunt van *R*1 en *R*2 dient als referentiepunt.



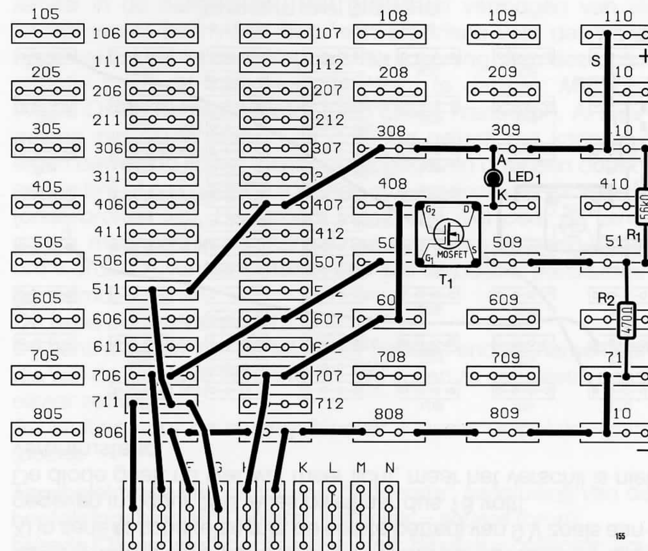
Figuur 154. Dubbele sturing: met elk van beide potmeters kan de lichtintensiteit worden ingesteld, maar de positie van de loper van de potmeter die niet wordt gebruikt is bepalend voor de grenswaarde.

Nu blijkt: als een van de beide potmeters P1 of P2 op h is ingesteld, kan met de andere potmeter de lichtintensiteit worden teruggebracht tot "nul". Als echter een van beide op n is ingesteld, heeft de positie van de andere vrijwel geen effect. Je zult dan hoogstens, met G1 in gesperde toestand, in het donker een heel zwak schijnsel kunnen zien als je P2 opdraait. Blijkbaar stuurt G2 effectiever dan G1.
Je kunt met de beide potmeters tussen de eindtoestanden sturen zoals je wilt. Maar let op: hoe groot de maximale lichtintensiteit is die je met de ene potmeter kunt instellen, is afhankelijk van de actuele stand van de andere. Dat is net als bij de tuinslang: als je de waterkraan niet ver genoeg opendraait, komt er aan de uitgang niet veel water uit, ook als je het ventiel helemaal hebt opengedraaid.

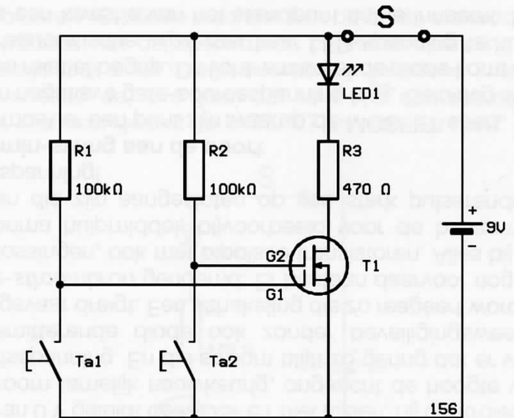
116 We breken deze schakeling af en bouwen de testschakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 156. Dan drukken we afwisselend op Ta1 en Ta2 en letten daarbij op de reactie van LED1. We zien dan dat de diode in beide gevallen minder licht geeft dan wanneer de toetsen zijn geopend. Logisch - per slot van rekening wordt het kanaal duidelijk "afgekneld" wanneer door een druk op een van de toetsen de betreffende gate wordt aangesloten op 0 V. Bovendien stellen we vast dat gate 2 - zoals hierboven al is opgemerkt - een grotere invloed heeft dan gate 1. Door een druk op Ta2 neemt de lichtintensiteit sterker af dan door het sluiten van Ta1.



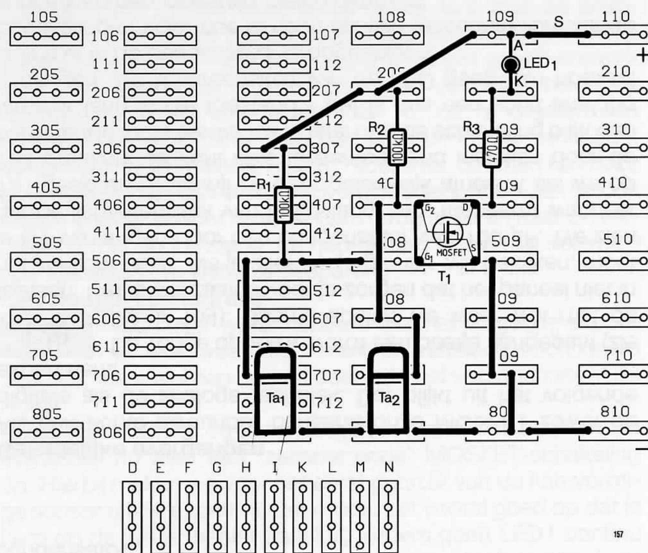
Figuur 153. Het opbouwschema bij figuur 152.



Figuur 155. Het opbouwschema bij figuur 154.



Figuur 156. Vergelijking van de gates: als je op Ta2 hebt gedrukt is LED1 vrijwel helemaal donker; na een druk op Ta1 gloeit ze nog héél zwak. Gate 2 heeft dus meer invloed dan gate 1.

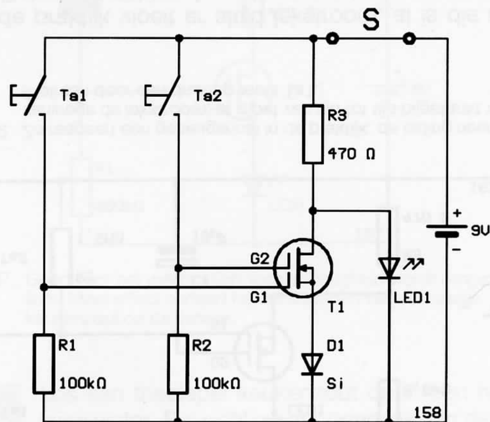


Figuur 157. Het opbouwschema bij figuur 156.

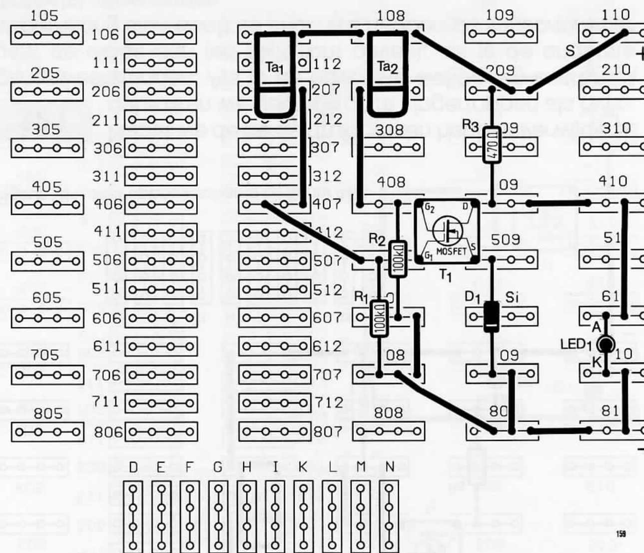
MOS-logica

Als bipolaire transistoren geschikt zijn voor logische schakelingen, waarom dan niet ook unipolaire?

117 De MOSFET als logische poort: voor de toepassing waarvoor we nu de schakeling opbouwen volgens de aanwijzingen in figuur 158, is het verschil tussen de beide gates van geen belang. Aanvankelijk geeft LED1 licht en signaleert zodoende Ja aan de uitgang. Er gebeurt niets als alleen Ta1 of Ta2 wordt gesloten. De licht-emitterende diode dooft pas als je op beide toetsen tegelijkertijd drukt. Daar hebben we nu eindelijk onze NEN-poort met de MOSFET - eentje is genoeg!



Figuur 158. NEN-poort met slechts één MOSFET: Ja aan gate 1 EN Ja aan gate 2 resulteert in NIET-Ja aan de uitgang (LED dooft).

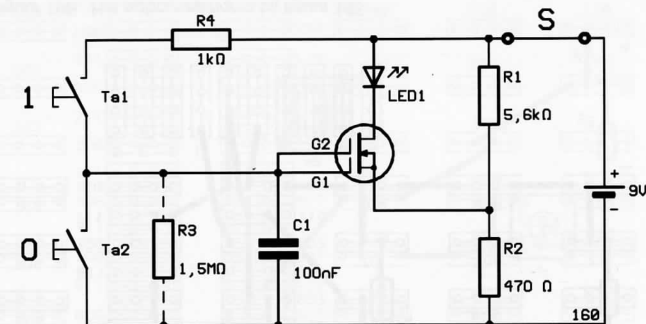


Figuur 159. Het opbouwschema bij figuur 158.

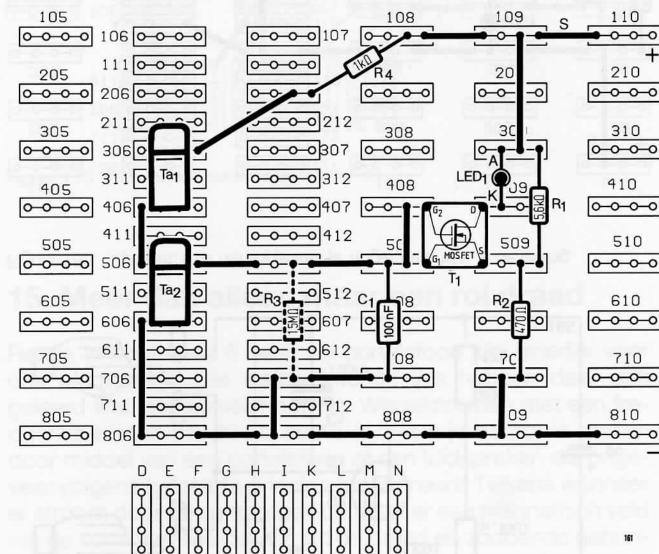
De volgende schakeling heeft in de wereld van de computers evenwel een heel voorname plaats ingenomen.

118 Refreshment-schakeling: met de schakeling zoals aangegeven in figuur 160 bouwen we een "sterk vergrote" computer-geheugencel zoals die er bij wijze van spreken onder de microscoop uit zou zien. De weerstand *R*3 laten we voorlopig weg. Door even op Ta1 te drukken schakelen we LED1 in. Als we na een poosje de schakeling bekijken, stellen we vast: de diode geeft nog steeds licht, tenminste als de batterij het nog doet. Pas door een druk op Ta2 veranderen we Ja in Nee - LED1 dooft.

119 We vervangen *C*1 door een condensator van 10 µF en sluiten de plus-pool aan op G1. Parallel daaraan nemen we nu de weerstand *R*3 van 1,5 MΩ op in de schakeling (figuur 162). Op die manier breiden we de "microscoop" uit met een "camera voor vertraagde beelden". Vervolgens drukken we weer op Ta1, maar blijven deze keer de schakeling nauwkeurig in het oog houden. Dan blijkt: na een paar seconden is LED1 aanzienlijk donkerder geworden - tijd om bij te tanken! Als we nu even op Ta1 drukken wordt het dadelijk weer licht - voor een poosje.



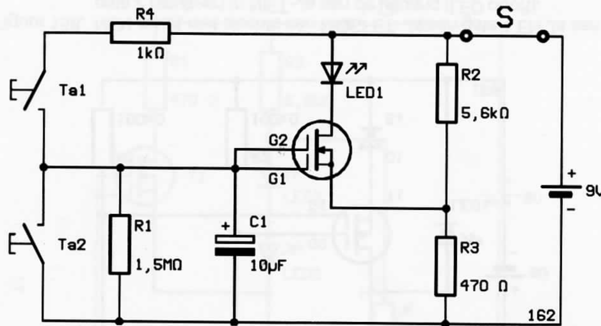
Figuur 160. DROM-geheugencel: Ja of Nee kan in één MOSFET worden opgeslagen. *C*1 houdt de betreffende waarde vast.



Figuur 161. Het opbouwschema bij figuur 160.

Deze beide experimenten hebben ons het volgende geleerd:

1. Door een condensator aan te sluiten op de gate (of ook al door de gate alleen als condensator te gebruiken) kun je de MOSFET-ingang in de ja- of nee-toestand houden. Deze keer signaleert LED1 door op te lichten dat er Ja op de ingang is aangesloten, want dan vloeit er stroom door het kanaal (dus Nee aan de uitgang, met betrekking tot de spanning).
2. Als de oxydelaag voor een volmaakte isolatie zou zorgen, dan zou de gate de betreffende lading eeuwig kunnen vasthouden (of zolang totdat we dit "ruw" onderbreken door een druk op toets Ta2). Dat wil zeggen dat het geheel bistabiel is, een flip-flop, dus een geheugencel voor Ja of Nee.



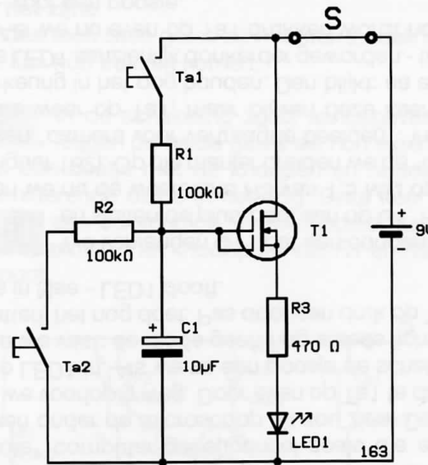
Figuur 162. Zo reageert een geheugencel in de praktijk: de lading neemt af vanwege de lekstroom; er moet van tijd tot tijd bijgetankt worden. (Refresh door een druk op toets Ta1.)

3. In de praktijk vloeit er altijd lekstroom, al is die nog zo gering. Dat wordt echter door de computer gecompenseerd: hij vult de ladingen van tijd tot tijd aan. Op dezelfde manier waarop wij dat bij onze macrocel door middel van Ta1 in een vertraagd tempo hebben gedaan. In de moderne vaktaal wordt dit *refresh* genoemd. Dit is dus een dynamisch proces. Vandaar de naam *DRAM* voor een dergelijk geheugen (Dynamic Random Access Memory - dynamisch leesgeheugen).
Dit werkt bovendien verhelderend met betrekking tot onze ingangsproef: wat de gate-condensatoren eenmaal hebben opgevangen, houden ze vast totdat van buitenaf een andere "laadspanning" wordt aangesloten - via de grote "omgevingscondensator".

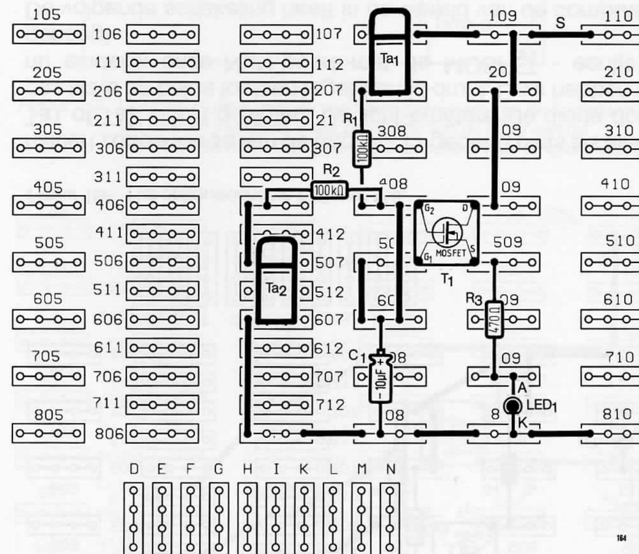
Geleidelijke overgangen

Als een echte allrounder beheerst onze MOSFET zowel de digitale als de analoge techniek. Dat blijkt uit het volgende experiment.

120 De vorige opbouw wordt een beetje aangepast (zie figuur 164). Daarna spelen we weer wat met de toetsen. Het is wel zaak ervoor te zorgen dat het paneel niet in het zonlicht staat. Als je alles op je gemak wilt bekijken, moet je *C*1 vervangen door een condensator van 100 µF. We zien dat de lichtintensiteit van LED1 langzaam toeneemt wanneer Ta1 gesloten is, terwijl ze weer geleidelijk afneemt als we op Ta2 drukken. Je kunt elke tussentoestand instellen door de betreffende toets eerder los te laten. En de schakeling blijft dan tamelijk lang in die toestand - dat is dus een soort *analoog geheugen*. De lichtintensiteit van de LED geeft aan hoeveel lading er in de condensator is opgeslagen.
Schakelingen waarmee lampen op een gewenste lichtsterkte kunnen worden ingesteld, heten *dimmers*.



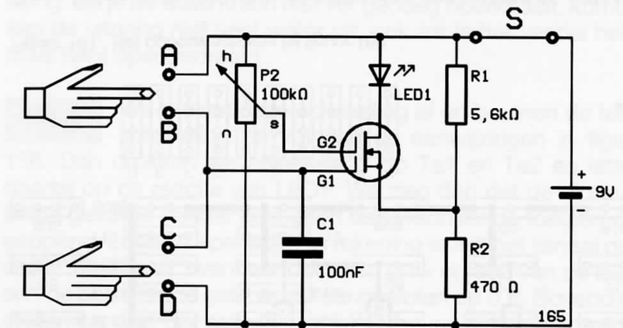
Figuur 163. Analoog geheugen resp. dimmer met druktoetsen: *C*1 houdt elke tussentoestand voor de lichtintensiteit van LED1 vast.



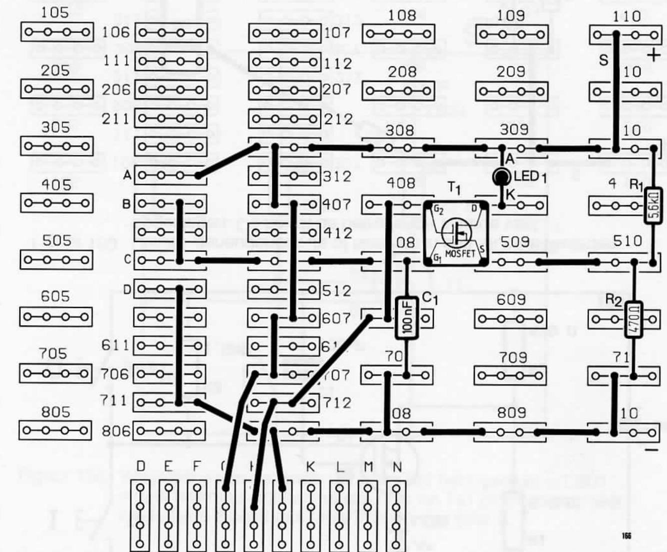
Figuur 164. Het opbouwschema bij figuur 163.

121 Nadat we de beide druktoetsen hebben verwijderd, gebruiken we gewoon onze vingertoppen als overgangsweerstanden. Als je de bovenste elektroden overbrugt gaat de diode aan (en blijft licht geven); als je de onderste stroomkring sluit dooft ze snel. We hebben de *sensordimmer* (tiptoets) uitgevonden.

Elektrolytische condensatoren (elco's) zijn geen ideale condensatoren. Een beetje (stroom) vloeit er altijd wel. Weliswaar maar een paar micro-ampère, maar dit leidt ertoe dat de lading langzaam afneemt. Foliecondensatoren zijn in dit opzicht gunstiger, maar die beschikken bij een even groot volume over aanzienlijk minder capaciteit. Ons exemplaar van 0,1 µF gunt ons bij het dimmen niet veel tijd. Je kunt de klemveren het beste steeds maar even aanraken. De reactie verloopt wetmatig: de tijdconstante, het produkt van *R* en *C*, bepaalt immers hoe snel het laad- of ontlaadproces zich voltrekt.



Figuur 165. Tiptoets: met het topje van je vinger verander je de lading.



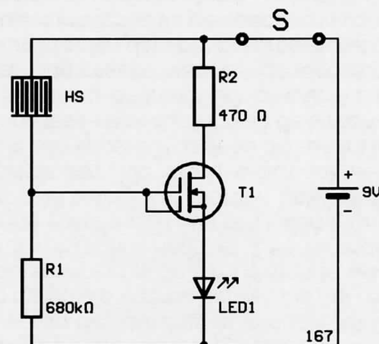
Figuur 166. Het opbouwschema bij figuur 165.

122 We grijpen weer terug op de truc met de spanningsdeler aan de source en bouwen de tiptoets op zoals aangegeven in figuur 165. Daarbij vervult gate 2 eindelijk weer een eigen taak. We overbruggen de beide bovenste klemveercontacten en stellen door P2 op te draaien een bovengrens in voor de lichtsterkte die echter onder het hoogst bereikbare niveau dient te liggen. Tijdens het dimmen kan deze bovengrens dan niet worden overschreden, hoe vaak je ook tussen donker en licht varieert. (Om terug te keren naar de vergelijking met de tuinslang: de hoofdkraan wordt niet helemaal opengedraaid om water te besparen!)

Een vleugje vochtigheid

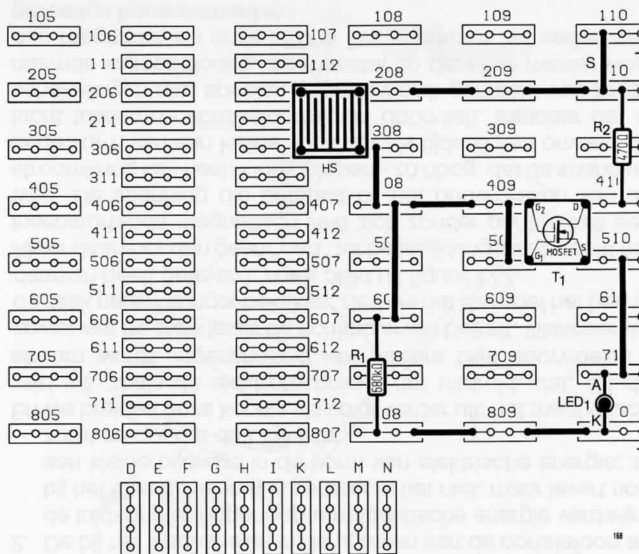
Nu we het toch over water hebben: met het volgende experiment kun je weliswaar niet exact de relatieve vochtigheid bepalen, maar wel een opgaaf doen van het vochtgehalte in de lucht.

123 Volgens de aanwijzingen in figuur 167 bouwen we nu weer een “zelfsperrende” MOSFET-schakeling op. Hierbij maken we voor het eerst gebruik van de kamvormige sensor uit de experimenteerdoos. Let vooral goed op dat je hem op de juiste manier aansluit, anders geeft LED1 continu licht! (De “tanden” moeten van de plus-pool in de richting van de gate wijzen; als je hem verkeerd om aansluit, krijg je een brug tussen plus en gate!) Aanvankelijk blijft LED1 donker, tenzij je met het paneel in de regen gaat staan. Vervolgens gaan we flink op de sensor ademen. Het resultaat is weliswaar niet indrukwekkend, maar toch - er is even een zwak schijnsel te zien.



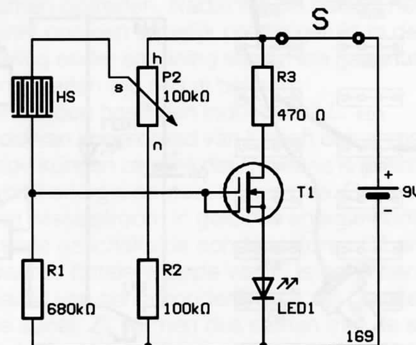
Figuur 167. Goed voor het weerstation: luchtvochtigheid wordt omgezet in licht. Meer effect sorteert het aanbrengen van een laagje keukenzout op de sensor.

124 Los een theelepel keukenzout op in een half glas lauw water. Bevochtig het oppervlak van de sensor met een paar druppels van deze oplossing en laat de sensor vervolgens in horizontale positie drogen. De laag zoutkristallen die zich dan vormt is een uitstekende detector voor luchtvochtigheid. We hebben de proef genomen met een weerstandsmeter: meer dan 20 MΩ bij een lage luchtvochtigheid, minder dan 200 kΩ als je erop ademt. Nu is de proef veel leuker: we houden het topje van onze vinger vlak boven de kristallaag, maar raken deze niet aan. De licht-emitterende diode begint al in dit microklimaat met een hoge plaatselijke luchtvochtigheid fel licht uit te stralen! Als we onze vinger terugtrekken wordt het licht van de diode weer langzaam zwakker. Deze sensor is echter niet geschikt voor gebruik in de keuken of andere ruimten waarin zich veel waterdamp bevindt.

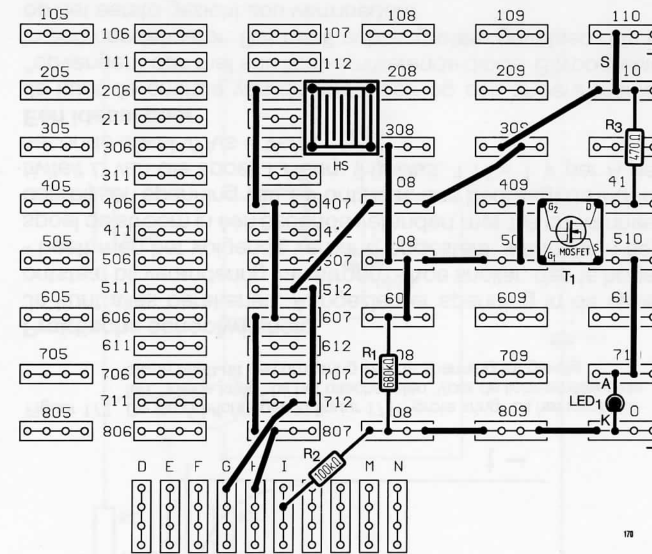


Figuur 168. Het opbouwschema bij figuur 167.

125 We breiden de schakeling uit zoals aangegeven in figuur 169 en kunnen dan zelfs het punt waarop de reactie inzet variëren.



Figuur 169. Instelbare gevoeligheid: zorgt voor een referentiepunt.



Figuur 170. Het opbouwschema bij figuur 169.

15. Meer dan alleen maar een rol draad

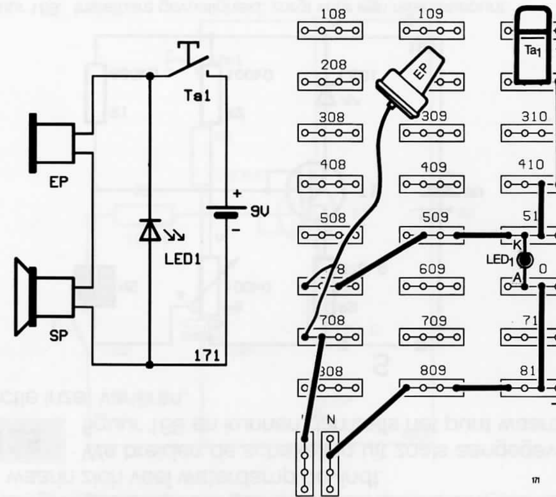
Reeds in hoofdstuk 6 heeft de oortelefoon zijn innerlijk voor ons blootgelegd (zie insider-info 8). We hebben daar ook geleerd wat een wisselstroom is. Wisselstromen met een frequentie tussen ca. 20 Hz en 16 kHz kun je hoorbaar maken door middel van een oortelefoon of een luidspreker, die ongeveer volgens hetzelfde principe functioneert. Telkens wanneer er stroom door de spoel vloeit ontstaat er een magnetisch veld - in de vorm van een cirkel rond de draad en zodoende gebundeld in het inwendige van de spoel met een noord- en zuidpool.

Wisselstromen hebben zo hun problemen met spoelen. Dat is te wijten aan een geheimzinnige factor, de *zelfinductie*. Die zou het liefste alles zo laten als het op een gegeven moment is. Als we een stroom door de spoel willen sturen, wordt door deze stroom eerst een tegenspanning opgewekt die het vloeien van de stroom zou willen verhinderen. Aangezien de tegenspanning alleen optreedt wanneer de stroomsterkte verandert, lukt haar dat niet. Uiteindelijk vloeit er zoveel stroom door de spoel als volgens de wet van Ohm is toegestaan: aangelegde spanning gedeeld door de gelijkstroomweerstand van de draad. In de spoel bevindt zich nu magnetische energie; er is een magnetisch veld gevormd. Al kun je dat met je ogen net zo min zien als het elektrische veld in de condensator.

Insider-info 13

Bij gelijkstroom loopt de stroom door de spoel uiteindelijk altijd op tot de maximale waarde, zoals die wordt bepaald door de ohmse weerstand van de wikkeling en de aangelegde spanning. Bij wisselstroom ligt dat anders. Hoe sneller de wissel, des te kleiner is de kans dat de stroom deze eindwaarde haalt. Deze reactie is erg interessant: telkens wanneer de wisselspanning aan de spoel de maximale waarde heeft bereikt bedraagt de stroomsterkte precies 0 A. Terwijl de spanning daalt, stijgt de stroomsterkte! Op het moment waarop de spanning is gedaald tot 0 V heeft de stroom zijn maximale waarde bereikt. Op het negatieve toppunt van de spanning is de stroomsterkte weer gelijk aan nul en wordt vervolgens negatief. Elke verandering van de stroomsterkte voltrekt zich dus een kwart trilling later. Aangezien een hele trilling kan worden gelijkgesteld aan een volledige cirkelbaan (360° of 2π), wordt ook wel gezegd dat de stroom in een spoel 90° naijlt op de spanning. Of anders uitgedrukt: de *fase-verschuiving* van de stroom ten opzichte van de spanning bedraagt 90° of π/2. Als je je nog de stroom-spanningsreactie van de condensator herinnert, kun je daaruit afleiden dat voor die precies het omgekeerde geldt. Dat biedt interessante perspectieven voor het koppelen van spoelen en condensatoren. Je kunt je dus wel voorstellen: hoe sneller de wissel van plus naar min, dus hoe hoger de frequentie van de wisselspanning, des te zwakker is de maximale stroom in elke trilling. Blijkbaar neemt de weerstand van de spoel toe naarmate de frequentie stijgt. Bij gelijkstroom is deze *wisselstroom-weerstand* eenvoudigweg gelijk aan nul! Die weerstand is onderworpen aan de simpele formule $X_L = 2 \times \pi \times f \times L$, waarbij *L* staat voor de inductiviteit van de spoel. *X* dient ter onderscheiding van de ohmse, dus (ook) bij gelijkspanning optredende weerstanden. Terwijl de ohmse weerstanden elektrisch vermogen omzetten in warmte, neemt deze *inductieve weerstand* een gedistingeerde terughoudendheid in acht. Aangezien $P = U \times I$, maar omdat bovendien bij deze weerstand *U* en *I* ten opzichte van elkaar zijn verschoven komt in dit geval geen warmte vrij. De toegevoerde energie keert op grond van de wisselwerking tussen elektrische en magnetische energie altijd weer gewoon terug naar de bron. Vandaar dan men in dit geval ook wel spreekt van *reactantie*.

126 Met behulp van de proef zoals aangegeven in figuur 171 maken we magnetische energie zichtbaar. Of beter gezegd een van haar effecten. Om ervoor te zorgen dat de licht-emitterende diode het ook zonder beveiligingsweerstand overleeft, moeten we de diode in sper-richting ten opzichte van de batterij aansluiten. Dat wil zeggen: de afgeplatte kant en het korte pootje dienen deze keer op de plus te worden aangesloten. Vervolgens drukken we op Ta1 en houden de licht-emitterende diode in het oog. Maar zelfs in het donker zien we dan - niets. Alleen in de oortelefoon klonk er even een knakkend geluid. Teleurgesteld laten we de toets (zo snel mogelijk) los. En dan pas is er een korte en niet al te felle lichtflits te zien, ook nu weer vergezeld van een knakkend geluid. We verwisselen de rode en de groene LED en herhalen de proef om te zien welke diode meer licht geeft.



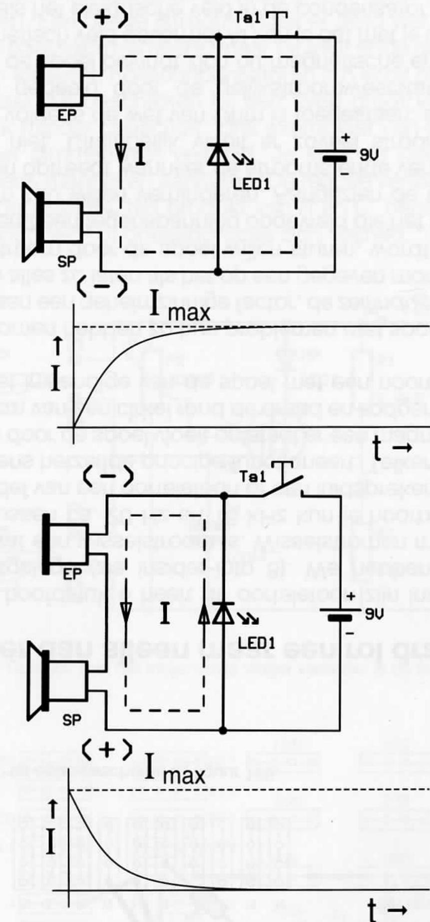
Figuur 171. Het zichtbare effect van de inductie: ineenstortend magnetisch veld wekt tegenspanning op - LED flitst even op.

Twee dingen hebben we uit deze proef geleerd:

1. Aangezien de LED alleen licht geeft bij het uitschakelen moet de stroom van richting zijn veranderd.
2. De bij het inschakelen in de spoelen van de oortelefoon en de luidspreker opgehoopte magnetische energie verdwijnt bij het uitschakelen niet zomaar in het niet, maar levert nog een kleine bijdrage in de vorm van elektrische energie: zij zorgt ervoor dat de LED flitst.

En we breiden onze kennis als volgt verder uit: het magnetisch veld wil, zoals de elektrotechnicus dat uitdrukt, dat, als de stroom wordt uitgeschakeld, die stroom blijft doorvloeien - zowel wat de sterkte als de richting ervan betreft. Wanneer we de zaak nauwkeuriger bekijken, zien we dat de proef het bewijs daarvan heeft geleverd, zoals blijkt uit figuur 172.

Als er daarvoor dan geen "pad" ter beschikking staat, zoekt het ineenstortende magnetisch veld zich zonder pardon zelf een weg. De spanning die ontstaat bij het onderbreken van de stroomkring kan heel hoog oplopen - zó hoog, dat de spanning in de vorm van een kleine vonk net als tijdens een onweer de lucht tussen de schakelcontacten doorklieft. Vandaar dat in schakelingen met spoelen gebruik wordt gemaakt van zogenaamde vrijloopdiodes, die meestal op dezelfde manier worden toegepast als onze LED's. Dat voorkomt het verlies van gevoelige bouwelementen.



Figuur 172. De stroomrichtingen in figuur 171: "grote kring" bij het inschakelen, "kleine kring" bij het uitschakelen. Voor de licht-emitterende diode heeft dit een omkering van de spanning tot gevolg.

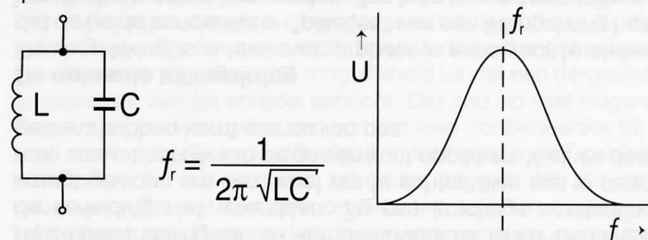
Praktische schoolwijsheid

Je kunt alles berekenen. Aangezien er spanning in de spoel ontstaat bij verandering van stroom - hoe sneller, des te hoger - heeft men het volgende verband opgesteld: wanneer in een spoel de stroom in één seconde verandert met 1 A en wanneer daarbij een spanning van 1 V ontstaat, dan bedraagt de *inductiviteit L* van die spoel 1 *Henry* (H). Dus: 1 H = 1 V per A per seconde ofwel V/A/s = Vs/A.

Een ideaal paar

Je kunt de energie van de spoel ook op een andere manier "opvangen" dan met een licht-emitterende diode. Bijvoorbeeld in een condensator. Dat heeft echter grotere gevolgen dan je op het eerste gezicht zou vermoeden.

Weet je het nog: in het begin is de condensator leeg. Dan wordt hij geladen - met een elektrische stroom. Net als in een glas dat wordt gevuld met water, stijgt daarbij de spanning naarmate de lading groter wordt. Een geladen condensator beschikt dus over een bepaalde spanning en in het binnenste ervan heerst een elektrisch veld. In een spoel waar stroom door heen vloeit heerst daarentegen een magnetisch veld. Terwijl in de condensator bij het inschakelen de spanning zich ophoopt, stijgt in de spoel na het inschakelen de stroom tot een maximale waarde.
Als je een geladen condensator verbindt met een spoel (figuur 173), verplaatst de elektrische lading zich, door de remmende werking van de stroom op grond van de zelfinductie, naar de spoel.

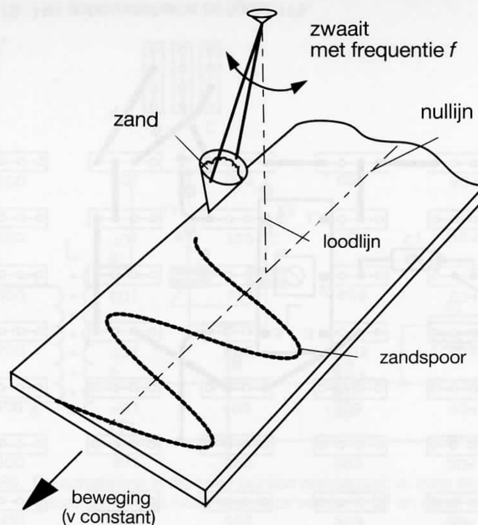


Figuur 173. Parallelle trillingskring bestaande uit L en C: de energie schommelt tussen deze twee heen en weer. Hoe kleiner de waarde van L en C, des te hoger is de (resonantie)frequentie. De trilling beantwoordt aan de in de figuur aangegeven vergelijking van Thomson.

De energie van de condensator zit nu als magnetische energie in de spoel en de spoel zorgt er nu voor dat de stroom in dezelfde richting wordt voortgestuwd. Daarbij neemt de energie van het magnetisch veld echter af en de stroom wordt zwakker. Veel belangrijker is het echter dat de condensator intussen door de spoel in tegengestelde richting wordt opgeladen. Hij is zodoende in staat om te pareren: zodra de magnetische energie is uitgeput, stuurt hij van zijn kant in tegengestelde richting weer stroom naar de spoel. Dit is dus een periodiek proces. En ook dat kun je berekenen. Meneer Thomson heeft dat gedaan: de resonantiefrequentie f_r is gelijk aan de omgekeerde waarde van het produkt van 2 π en de wortel uit *L* maal *C*. (De formule is weergegeven in figuur 173.)

Verliesgevende zaak

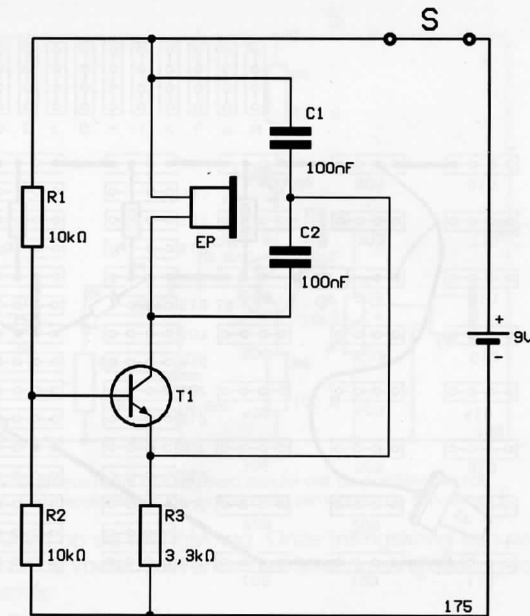
Een trillingskring zou eeuwig kunnen blijven trillen met de *resonantiefrequentie* f_r, net zoals bijvoorbeeld een slinger of een schommel, als er maar geen verlies optrad. Bij de slinger en de schommel ontstaat dat verlies voornamelijk door wrijving in het kogellager. In de trillingskring is het hoofdzakelijk de draadweerstand van de spoel die ervoor zorgt dat elke trillingsamplitude een beetje kleiner is dan de voorgaande. Dat wordt een *gedempte trilling* genoemd.
A propos, slinger. Stel je voor dat je een met fijn zand gevulde puntzak met een gaatje aan de onderkant aan een draad heen



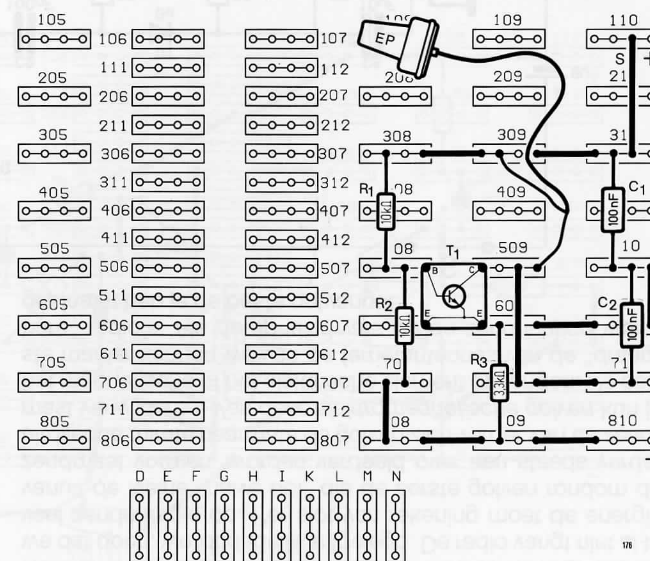
Figuur 174. Zo ontstaat een sinus-curve.

en weer laat zwaaien. En dat je tegelijkertijd in een gelijkmatig tempo een plank onder de uitgestrooide straal zand door schuift. Wat je dan krijgt kun je zien in figuur 174. Zoiets wordt een *sinus-curve* genoemd.
Een trillingskring produceert dezelfde kromme. Alleen heb je bijvoorbeeld een *oscilloscoop* nodig om die te kunnen zien. Bij zo'n oscilloscoop wordt de spanning weergegeven door een lichtstip op een beeldscherm en de straal die het lichtpunt projecteert wordt in een constant tempo over het scherm "getrokken" - net zoals de plank in figuur 174.

127 Het is weer stilaan tijd voor een echte proef. In de schakeling zoals aangegeven in figuur 175 laten we *L* en *C* samen optreden. Nadat we de batterij hebben aangesloten, klinkt ons een tamelijk prettig geluid in de oren zolang de schakeling onder spanning staat. Hoe gaat dat in z'n werk?
De volgende feiten zijn ons al bekend:
1. De oortelefoon heeft een inductiviteit *L*.
2. De spoel van koperdraad van *L* heeft een ohmse weerstand *R*. Je zou kunnen zeggen dat *R* in serie is geschakeld met *L*.
3. In *R* wordt energie omgezet in warmte. Ook voor de omzetting van wisselstroom in geluid is energie nodig.
4. De in serie geschakelde condensatoren C1 en C2 met gelijke waarde (totale waarde van *C* is gelijk aan de helft van de waarde van een afzonderlijke *C*) zijn parallel geschakeld met de spoel. Zij vormen dus samen met de spoel een parallelle trillingskring. Deze wordt gedempt door *R* en de geluidsuitstraling in de oortelefoon.



Figuur 175. De Colpitts-oscillator: trillingskring bestaande uit de inductiviteit van de oortelefoon en twee in serie geschakelde C's; begint te trillen door een stroomstoot bij het inschakelen; wordt op gang gehouden door terugkoppeling van energie.



Figuur 176. Het opbouwschema bij figuur 175.

5. Om ervoor te zorgen dat de trilling stabiel blijft moeten deze verliezen worden gecompenseerd. Dat doet de schakeling door middel van de transistor.

De oplossing van Colpitts

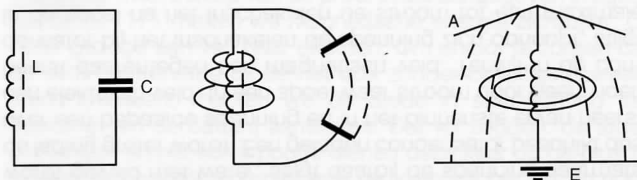
In figuur 175 is een van de talloze mogelijkheden te zien waarop je de opgave om trillingen op te wekken kunt oplossen. Deze is bedacht door meneer Colpitts en functioneert als volgt: het rustpunt is de basis van de transistor. Dat is de derde manier waarop je bipolaire transistoren kunt schakelen - de *basisschakeling*. De trillingskring ligt in de uitgangskring, aan de collector. De ingang van deze versterker is de emitter. De beide condensatoren vormen een *capacitieve spanningsdeler*. Vanuit hun knooppunt wordt een gedeelte van de energie van de trillingskring teruggekoppeld naar de ingang van de versterker, dus naar de emitter. De transistor versterkt die energie zoveel als op een gegeven moment vereist is, net zoals je een schommel steeds op het juiste moment een zetje geeft zodat hij netjes op en neer blijft zwaaien.
Nadere uitleg: de transistor wordt in deze schakeling gesperd wanneer aan de emitter een positieve spanning ten opzichte van de basis wordt aangelegd. Daardoor stijgt ook de spanning aan de collector naar plus. Of anders uitgedrukt: Ja aan de ingang wordt Ja aan de uitgang. Dat doet denken aan de collectorschakeling. Als er wisselspanningen in het spel zijn kun je ook zeggen: de spanningen zijn *in fase*.

16. Kleine radio's - zelf gebouwd

Bij de behandeling van de AMP in hoofdstuk 13 konden we al de verleiding niet weerstaan. Zo een krachtige versterking vraagt gewoon om een proef om te achterhalen wat je daarmee zoal uit het rijk van de golven kunt oppikken. Wat we daar geleerd hebben komt ons nu van pas.

De ontaarde trillingskring

De vergelijking is al heel oud: probeer je eens voor te stellen dat de beide condensator-"plaatjes" van een trillingskring heel ver uit elkaar getrokken worden, dan krijg je een *open trillingskring*. De veldlijnen verspreiden zich door de vrije ruimte (figuur 177).

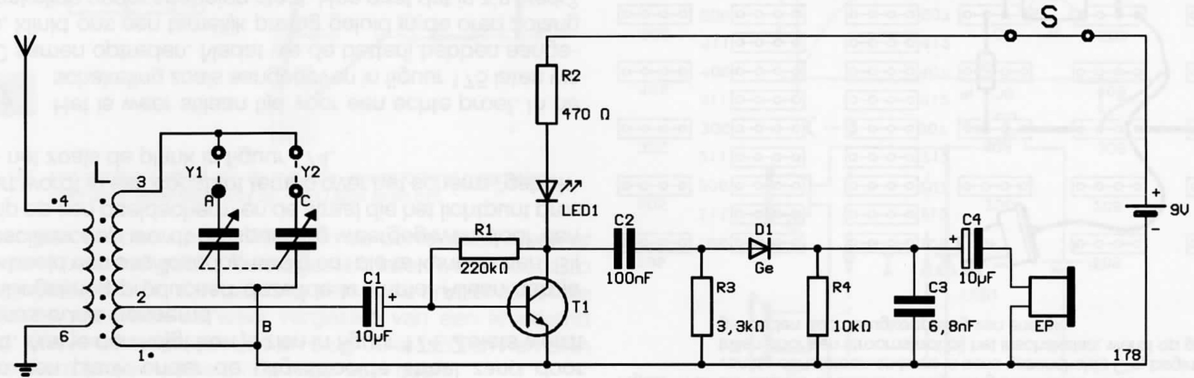


Figuur 177. Van de gesloten naar de open trillingskring: de veldlijnen verspreiden zich in de ruimte!

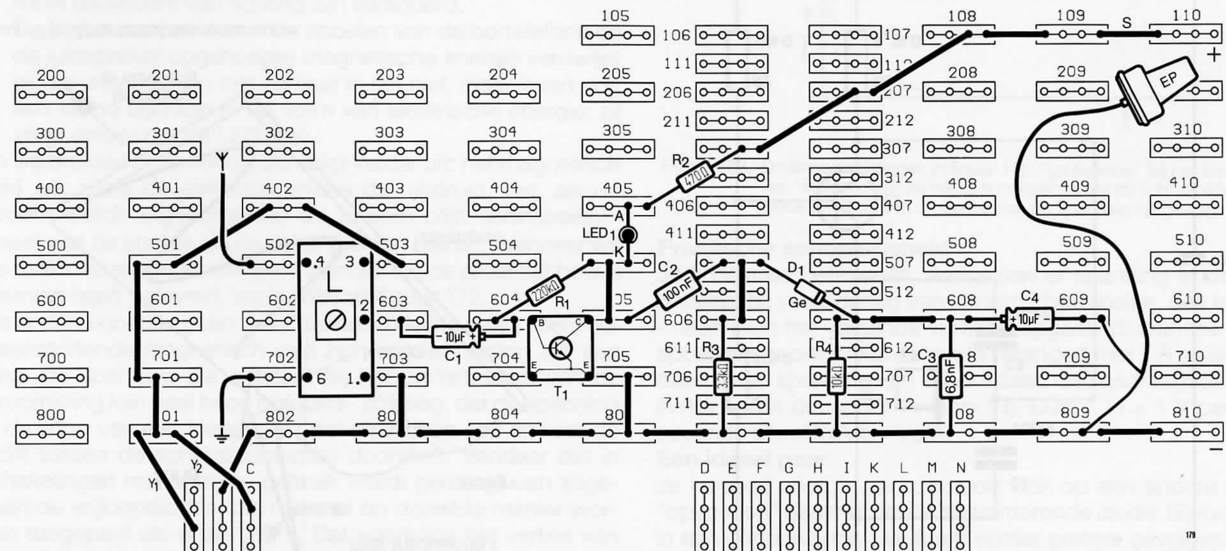
Dat is ongeveer wat er gebeurt bij een radiozender. Over de functie van zo'n zender hebben we het al in hoofdstuk 13 gehad. We beperken ons hier tot zenders met een frequentie tussen ongeveer 500 kHz en 1600 kHz, zogenaamde *middengolfzenders* met *amplitude-modulatie*. Die zijn nog het gemakkelijkste te ontvangen - een eindeloos gebied voor de beginner. Voor dit doel gaan we nu kennis maken met een aantal eenvoudige schakelingen. Die werken volgens dezelfde principes die al werden gehanteerd bij de bouw van de eerste radio's. Alleen beschikken wij tegenwoordig over moderne bouwelementen en is alles veel mooier.

Een goede antenne is de beste versterker

Naar dit motto zullen we ons slechts ten dele richten. Waarom we dat doen, wordt dadelijk uitgelegd. De radio vangt niet al te veel zendenergie op. Per slot van rekening moet de energie vanuit de kleine "halve bol" die de eerste golven rondom de zendmast vormen, worden verdeeld over een steeds verder uitdijende ruimte naarmate de golven zich verder van de zendmast verwijderen. Van deze *elektromagnetische golven* kun je het magnetische of het elektrische element opvangen. De eerste manier kennen we van de ferrietantennes van de "draagbare" radio's. Als de spriet dwars op de zendrichting wordt geplaatst heb je de beste ontvangst.



Figuur 178. Afgetapte trillingskring: kleine demping, maar lage spanning. De HF-versterker tilt de HF-spanning over de diodedrempel.



Figuur 179. Het opbouwschema bij figuur 178.

Een antenne voor de ontvangst van de elektrische veldkrachten bestaat uit een gewoon stuk draad dat zo hoog mogelijk wordt bevestigd. Dat is trouwens alleen dan nodig als er in de verre omtrek geen zendmast staat. In de grote steden word je tegenwoordig al bij gebruik van een kort eindje draad vaak onder meerdere zenders "bedolven". Daar moet je bij de volgende experimenten altijd rekening mee houden. En dan zijn er nog twee dingen die je niet mag vergeten:

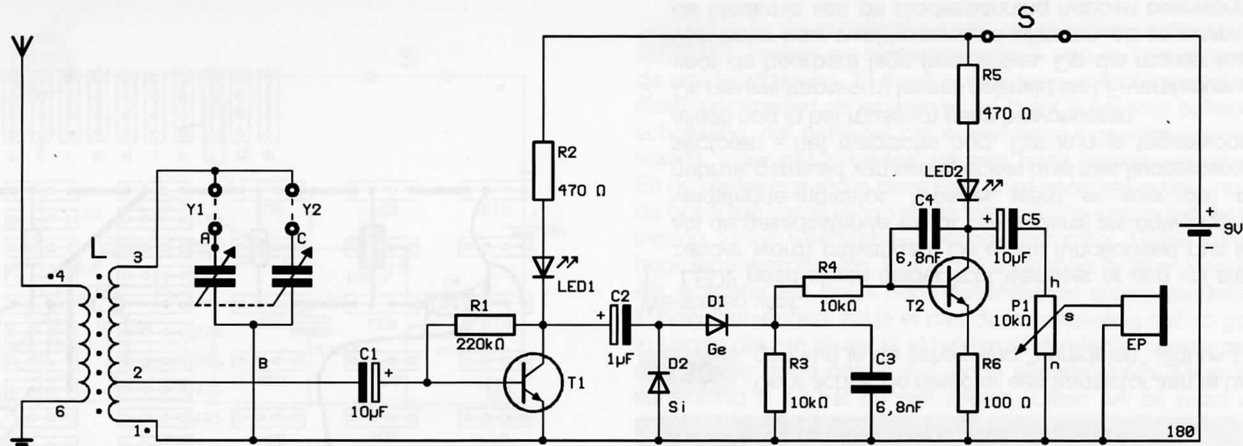
1. Als je radioprogramma's wilt ontvangen moet je ook bijdragen in de kosten van de zenders. Dus: alleen als je aangifte hebt gedaan van een ontvanginrichting en het luistergeld hebt betaald, mag je naar de radio luisteren.
2. In sommige schakelingen die we gaan bouwen wordt de trillingskring opgepept tot aan de grens van de resonantie. Zulke schakelingen mag je in geen geval aansluiten op een echte antenne; je mag alleen een stuk draad in de kamer gebruiken. Op die manier sluiten we de mogelijkheid uit dat een dergelijke ongewenste zender schade aanricht. Dat zou op veel hogere frequenties kunnen gebeuren, omdat een "onbeheerste trilling" vaak niet alleen de grondgolf in het middengolf-gebied produceert. En wie kan met zekerheid zeggen dat zijn zelf gebouwd apparaat niet bijvoorbeeld het luchtvaartradioverkeer stoort en daarmee het leven van mensen in gevaar brengt?

Daarom bevestigen we in de kamer slechts een paar meter draad voor onze provisorische antenne en gebruiken als aarde een stukje blank metaal van de waterleiding of van een radiator van de centrale verwarming.

Actieve antenne

Om uit een kleine antenne nog zoveel signalen te halen dat je die kunt demoduleren (vgl. hoofdstuk 13) moet je de minieme hoogfrequente spanning versterken. Per slot van rekening moet bij de demodulatie eerst de diodespanning van de gelijkrichterdiode worden overwonnen. Vandaar ook dat we een germaniumdiode gebruiken - haar diodespanning is duidelijk lager dan die van siliciumdiodes.

128 Net andersom als in figuur 143 verplaatsen we dus de versterking van "achteren" naar "voren" zoals aangegeven in figuur 178. Na de HF-versterker volgt dan een detectieschakeling waarin geen versterking meer plaatsvindt. Met de oortelefoon in het oor gaan we met behulp van de instelbare condensator op zoek naar iets dat de moeite waard is om naar te luisteren. Vervolgens gaan we een beetje experimenteren: we verwijderen *C*3 en stellen vast dat het opgevangen signaal duidelijk zwakker wordt. Als we daarna de waarde van de condensator verhogen tot 100 nF, horen we dat de hoge tonen ontbreken - het is net alsof het geluid uit de kelder komt. Nu vervangen we *R*1 door een weerstand van 680 kΩ en *R*2 door eentje van 2,7 kΩ en stellen tevreden vast: dit heeft slechts weinig effect. Logisch - de ingangsspanning is be-

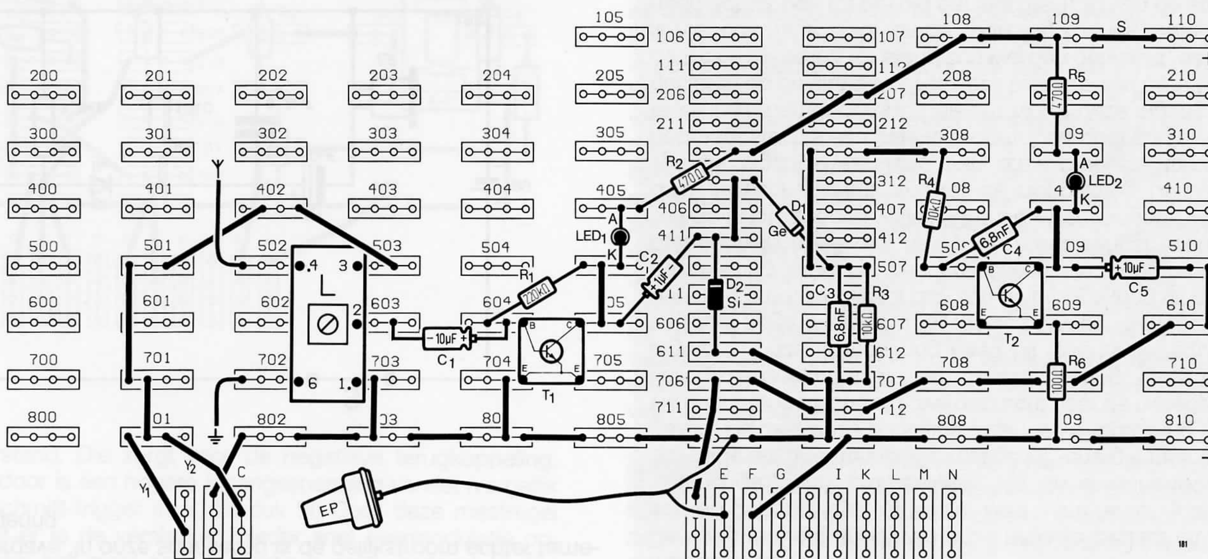


Figuur 180. De schakeling is op twee punten aangepast: a. door de tweede diode wordt de negatieve halve golf afgeleid zonder dat de positieve wordt gedempt; b. een extra transistor versterkt LF en geeft de zenderveldsterkte aan. Terugkoppeling in de emitterkring vermindert de vervorming.

hoorlijk laag en daarom hoeft het werkpunt niet precies bij $U_B/2$ te liggen. Overigens doet de licht-emitterende diode in de collectorkring dienst als bedrijfsindicator.

Nu gaan we ons bezighouden met de trillingskring en verplaatsen *C*1 van aansluiting 2 naar aansluiting 3. Resultaat: als er minstens twee zenders kunnen worden ontvangen, zijn ze nu nauwelijks meer van elkaar te scheiden. De transistoringang dempt de trillingskring nogal sterk, maakt zijn resonantiekromme "breder". Iets dergelijks gebeurt er als we de antenne direct aansluiten op de trillingskring. Onze trillingskring kan nog het beste uit de voeten met antennewikkeling en aftakking voor de versterker.

129 We vereenvoudigen de schakeling door *R*4 en *C*4 weg te halen en merken op dat daardoor vrijwel niets verandert. En toch: een magnetische oortelefoon dient altijd zodanig in de schakeling te worden opgenomen dat hij



Figuur 181. Het opbouwschema bij figuur 180.

niet in contact komt met gelijkstroom (condensator spert gelijkstroom!). Dit om te voorkomen dat er door toedoen van de gelijkstroom een voorspanning komt te staan over het membraan, hetgeen een nadelige invloed zou hebben op de weergave. In onze schakeling is de gelijkstroom echter tamelijk gering.

Figuur 182. Emittervolger aan de gehele trillingskring: heeft een hoge ingangsspanning nodig, maar dempt minder (hoge ingangsweerstand).

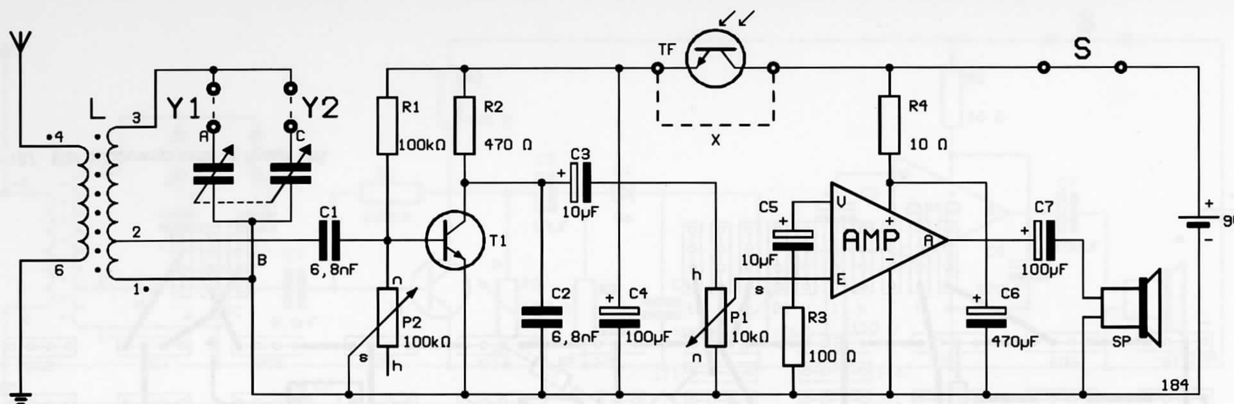
Figuur 183. Het opbouwschema bij figuur 182.

Insider-info 14
De hoogfrequent-spoel van onze module bestaat uit twee wikkelingen op een speciale kern van ferriet (dat zijn "aaneengelijmde" ijzerdeeltjes). Via de antennewikkeling wordt de uit de antenne afkomstige HF-energie naar aarde geleid. De over deze wikkeling staande HF-spanning wordt via haar magnetisch veld overgebracht naar de tweede wikkeling die deel uitmaakt van de trillingskring. Deze wordt afgetakt. Onze trillingskring heeft bij resonantiefrequentie een zeer hoge weerstand. Bij ideale bouwelementen zou hij oneindig groot zijn. Maar dan zou de trillingskring uit alle ter beschikking staande zenders alleen de hoogfrequente draaggolven oppikken, terwijl de moduleringsfrequenties "uit de boot" zouden vallen. Ohmse weerstanden "verbreden" de *resonantiekromme* van de trillingskring. De waarde van de ingangsweerstand van onze bipolaire transistor bedraagt slechts een paar kilo-ohm. Daardoor zou de kring te veel worden gedempt. Daarom wordt deze ingang aangesloten op de aftakking. Als deze bijvoorbeeld bij 1/10 van de totale wikkeling tot stand zou worden gebracht, dan zou je hier ook maar 1/10 van de spanning kunnen meten. Dat heeft echter ook tot gevolg dat slechts 1/10 van de stroom vloeit die er theoretisch zou kunnen vloeien. Aangezien spanning gedeeld door stroom gelijk is aan weerstand volgt hieruit: het effect van een bij 1/10 aangesloten belastingsweerstand is 10 x 10 keer zo groot als de weerstand op de totale wikkeling. Of anders uitgedrukt: weerstanden worden *getransformeerd* met het kwadraat van de transformatieverhouding (die in dit voorbeeld gelijk is aan 10 zodat 1 kΩ door transformatie wordt opgeschroefd tot 100 kΩ). Een geschikt compromis: weliswaar nog maar 10 % van de trillingskringspanning, maar in ruil daarvoor slechts 1 % demping voor de kring in vergelijking met een directe aansluiting. Als je dus een "scheiding" moet aanbrengen tussen verschillende zenders, heb je deze aftakking nodig!

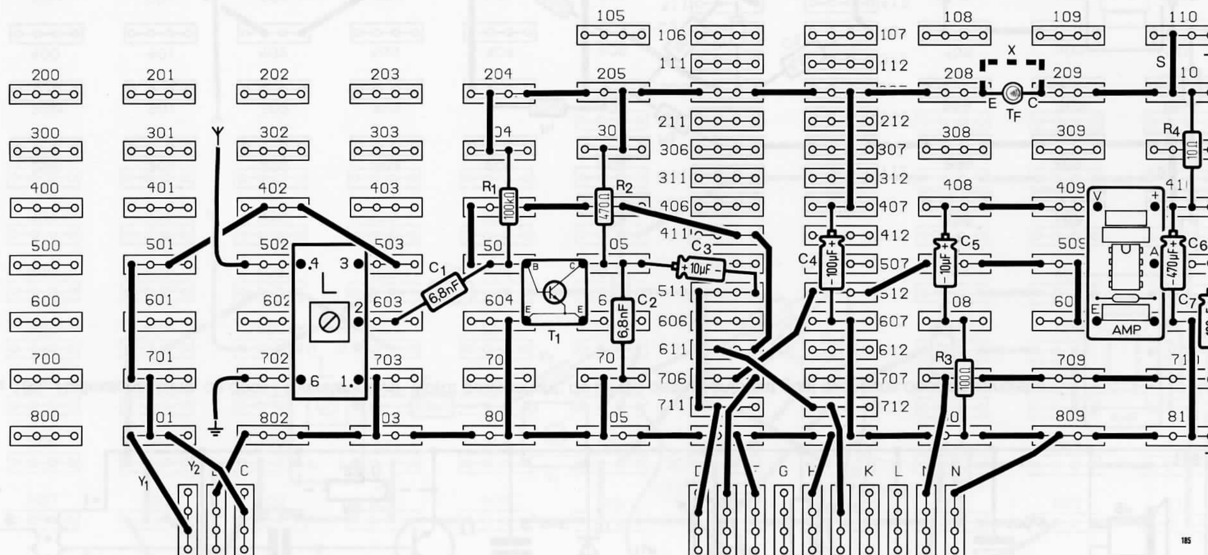
130 Door achter de detector een transistor aan te brengen kun je de schakeling "veredelen" (figuur 180).

We stellen vast:

1. LED2 geeft alleen helder licht wanneer er een vrij sterke zender wordt ontvangen. De diode functioneert dus (ook als de geluidssterkte wordt verminderd) als ontvangst- en veldsterkte-indicator. Vroeger werd er voor dat doel gebruik gemaakt van een speciale buis met fluorescerende sectoren - het *magische oog*. Dat kun je tegenwoordig alleen nog in het museum gaan bewonderen.
2. De nieuwe trap wordt tevens gebruikt als LF-versterker, dus voor de hoorbare lage frequenties. Op die manier kun je veel beter naar zwakke zenders luisteren, als ze tenminste de hindernis van de diodespanning hebben overwonnen.



Figuur 184. De audion-schakeling: de transistor richt gelijk en versterkt de zo verkregen toonfrequentie. Zoek met behulp van P2 het gunstigste punt! Als extraatje: de fototransistor in plaats van de brug X zorgt voor door de zon gestuurde ochtendmuziek. Alleen zinvol bij gebruik van de nettransformator, aangezien de AMP de hele tijd stroom "verbruikt"!



Figuur 185. Het opbouwschema bij figuur 184.

3. Door gebruik te maken van de siliciumdiode hebben we de gelijkrichterschakeling verbeterd. Zij zorgt ervoor dat alleen de negatieve halve golven worden afgevoerd naar min - wat ook onze bedoeling was. De eerder gebruikte weerstand daarentegen dempt ook de positieve halve golven.
4. In de emitteruitgang van de transistor bevindt zich een weerstand. Die zorgt voor de negatieve terugkoppeling. Daardoor is een hogere ingangsspanning vereist (vergelijk de Schmitt-trigger in hoofdstuk 9!) Door deze maatregel treedt er in de versterker minder snel overmodulatie op. Probeer het maar eens - overbrug de weerstand op het moment dat je een sterke zender ontvangt!

131 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 182 maken we eveneens gebruik van een weerstand in de emitteraftakking. T1 heeft echter geen collectorweerstand, maar functioneert als emittervolger. Weet je het nog: collectorschakeling, dat betekent dat er een hoge ingangsspanning is vereist, maar dat betekent ook een hoge ingangsweerstand. En op die weerstand is deze keer onze hoop gevestigd, nu we de bovenste aansluiting van de trillingskring verbinden met de ingang. Hoge weerstand = geringe demping. Totale kring = hoge ingangsspanning. Het zou dus eigenlijk moeten kloppen. Als je echter het geluk hebt verschillende sterke zenders te kunnen ontvangen, zul je er met deze schakeling niet zo goed in slagen die van elkaar te scheiden. Het *selectief vermogen* is dus minder goed dan in de vorige experimenten. Maar met aansluiting 2 wil het nu niet lukken. Laten we bij wijze van proef *C*1 hier eens op aansluiten! Je zult amper iets horen - de spanning is te laag voor deze trap.

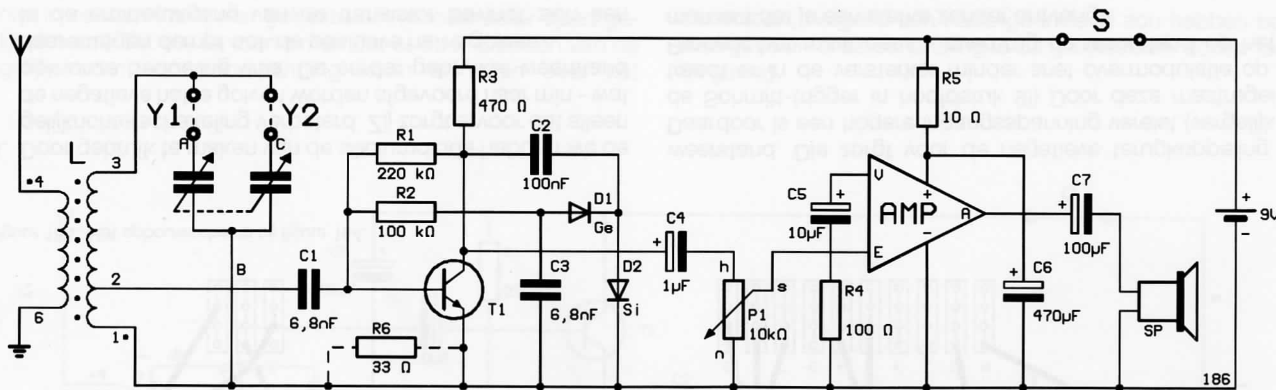
Audion: transistor maakt diode overbodig

Tot dusver waren de taken duidelijk verdeeld: transistoren voor de versterking, diodes voor de gelijkrichting. Maar per slot van rekening heeft de transistor een basis-emitterdiode!

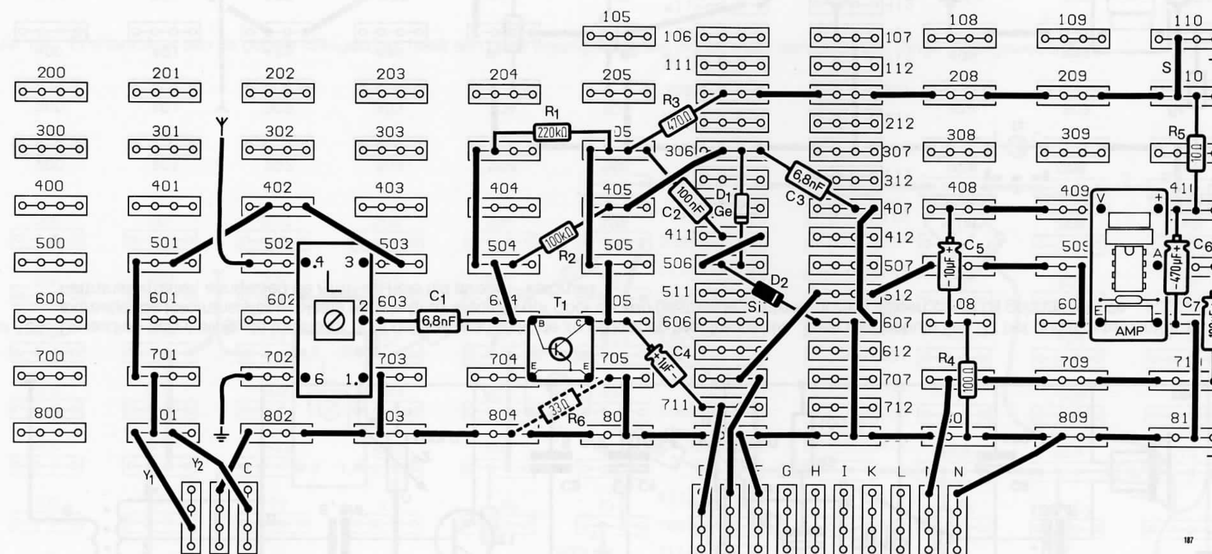
132 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 184, zetten P1 in de middelste stand en draaien de knop van P2 langzaam van n naar h. Zodra we ruis horen, zoeken we met de instelbare condensator een geschikte zender op. Vervolgens wordt met behulp van P2 de beste weergave ingesteld. Met P1 kun je de geluidssterkte instellen op een voor de tijd van de dag acceptabel niveau.

Het model voor deze combinatie van gelijkrichter en versterker in één bouwelement was het goede oude *audion* met buizen. Het is best mogelijk dat de uitvinder ervan, gebruik makend van de klassieke taal van de wetenschap, destijds heeft uitgeroepen "audio!", want zo zeg je in het Latijn "ik hoor!" Wat je hoort, zijn de toonfrequenties van de zender, door de basis-emitterdiode gescheiden van de ene kant van de symmetrische HF-draaggolf. Zij verschijnen als LF- of laagfrequente wisselspanning bij de condensator *C*1. Zijn gelijkspanningslading is een gevolg van de HF (ook als die op dat moment niet gemoduleerd is). T1 versterkt de LF, *C*2 leidt het meegevoerde HF-restant af om ervoor te zorgen dat dit in het verdere verloop van de schakeling niet ook wordt versterkt en mogelijkerwijze storingen veroorzaakt (ongewenste verbindingen, wijzigingen van het werkpunt enz.).

133 In figuur 184 zien we nog een veel voorkomende uitbreiding: als je in plaats van de draadbrug X de fototransistor T2 in de schakeling opneemt, dan wordt de radio automatisch ingeschakeld als het 's morgens licht wordt. (Let op bij batterijvoeding: de versterker gebruikt ook 's nachts stroom!)



Figuur 186. Reflexschakeling: de door T1 versterkte HF wordt gelijkgericht; de LF die daaruit ontstaat gaat eveneens door de transistor.

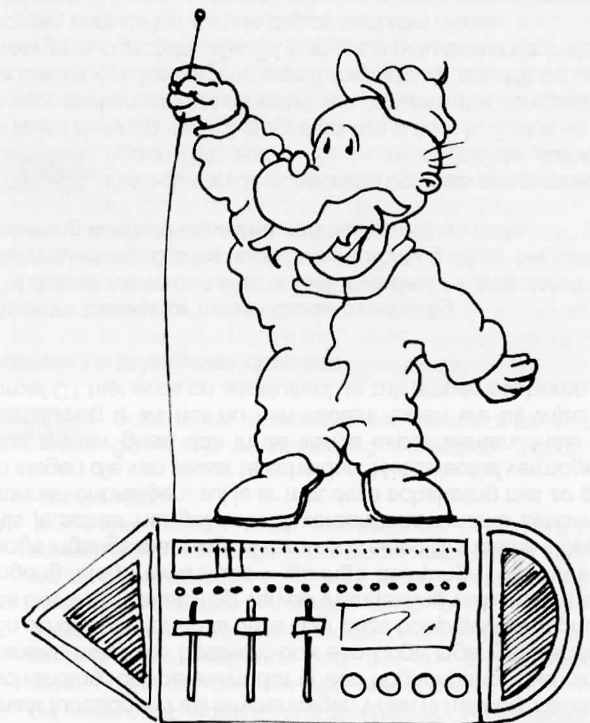


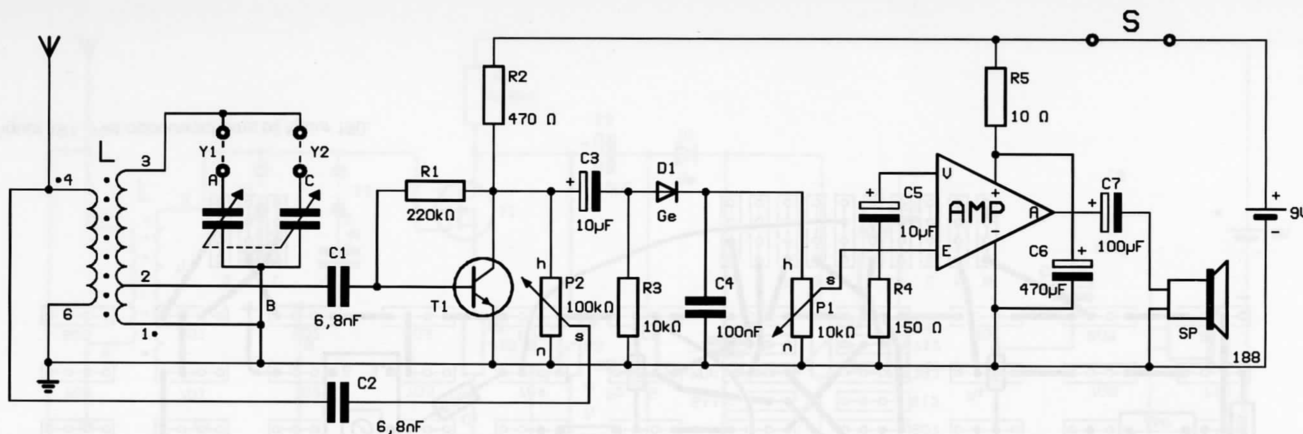
Figuur 187. Het opbouwschema bij figuur 186.

Goede reflexen

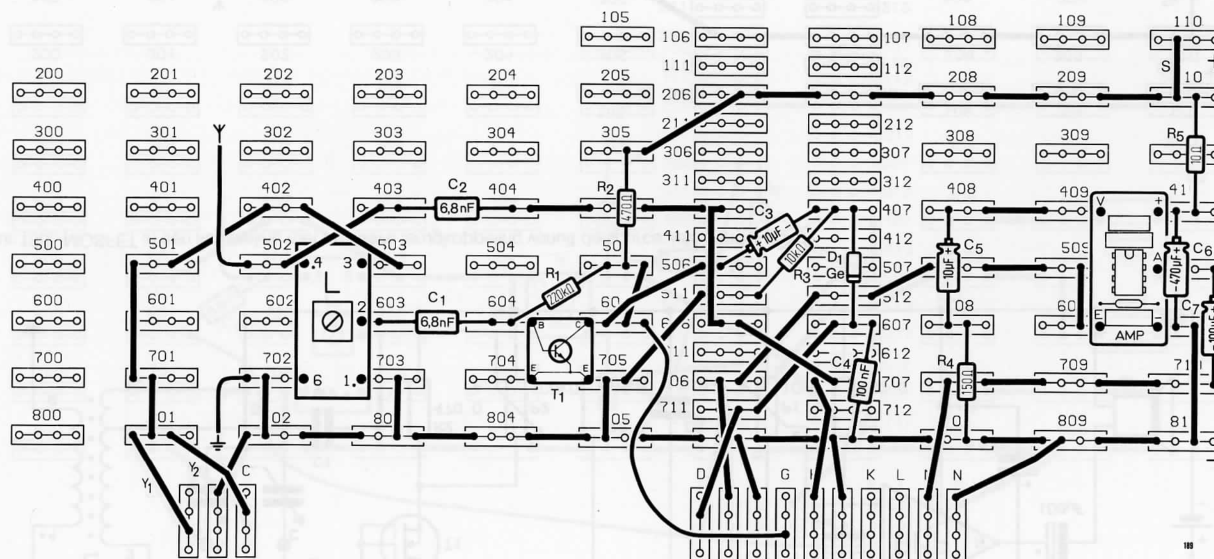
In de beginjaren van de radiotechniek waren er nog andere mogelijkheden voor het dubbele gebruik van een transistor, zoals de *reflextrap*. De transistor die wij tegenwoordig gebruiken in plaats van een buis versterkt eerst de HF. Daarna volgt een normale diodedetectie. Vervolgens wordt de zo verkregen LF teruggeleid naar dezelfde transistor en versterkt.

134 We bouwen de reflexontvanger op zoals aangegeven in figuur 186 en testen de eigenschappen ervan. Dan blijkt dat de schakeling van alles een beetje heeft. Ze is tamelijk gevoelig, maar sterkere zenders veroorzaken al een duidelijke vervorming. Daar kun je wat aan doen door de brug 705-805 te verwijderen en de weerstand *R*6 van 33 Ω in de emitterkring op te nemen.





Figuur 188. Kan het opnemen tegen menig fabrieksmodel: het opheffen van de demping (positieve terugkoppeling) leidt tot een aanzienlijke verbetering van de selectiviteit en de gevoeligheid.



Figuur 189. Het opbouwschema bij figuur 188.

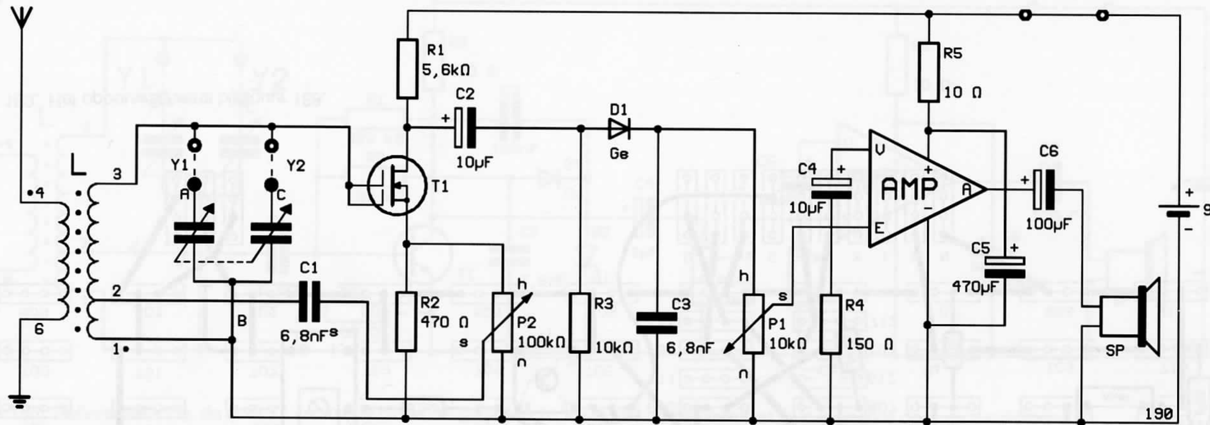
Bijna een zender: ontvanger met positieve terugkoppeling

Herinner je je nog waar we aan het begin van dit hoofdstuk voor gewaarschuwd hebben? In de volgende experimenten mag je als antenne alleen een kort eindje draad gebruiken.

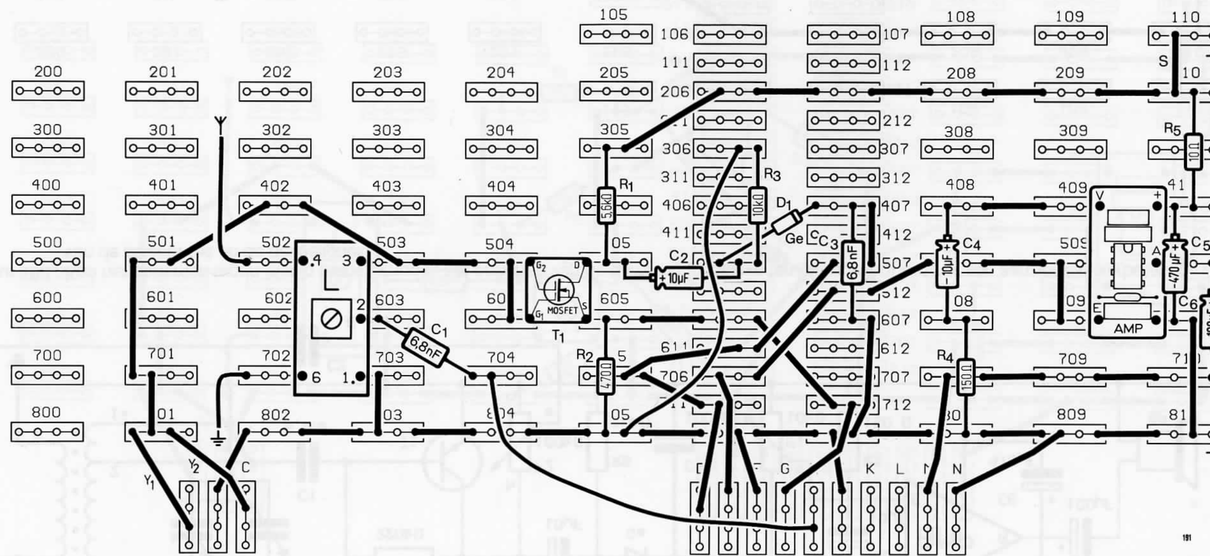
135 De schakeling in figuur 188, die we nu gaan opbouwen, verschilt op het eerste gezicht niet veel van de schakelingen die we al kennen. Die mening moet je herzien wanneer je tijdens het opzoeken van een zender aan de knop van P2 draait. Drie dingen moeten hier worden vermeld:

1. Als je P2 ver genoeg opdraait geven de zenders een "fluittoon" te horen. Voor een zuivere ontvangst dien je P2 terug te draaien tot (even) onder het punt waar het fluiten begint - bij sterkere zenders echter nog aanzienlijk lager vanwege de vervorming.
2. Nu kun je sterkere zenders tamelijk goed van elkaar scheiden, terwijl ze elkaar tevoren soms overlapten. Vooral 's avonds, wanneer de middengolfzenders beter te ontvangen zijn, kun je heel wat verderaf gelegen radiostations in huis halen.
3. Tot zover het goede nieuws, en nu het slechte: hoe dichter P2 nadert tot het punt waarop het fluiten begint, des te doffer klinken gesproken woord en muziek. De niet-gedempte trillingskring bekommert zich niet al te veel om frequenties die tamelijk ver verwijderd zijn van de resonantiefrequentie.

Het geheim achter al deze verschijnselen wordt *positieve terugkoppeling* genoemd, of met een beter woord *meekoppeling* (ter onderscheiding van de negatieve terugkoppeling). Die werkt in principe net zo als de Colpitts-oscillator in hoofdstuk 15. Een klein gedeelte van de versterkte HF-energie wordt teruggeleid naar de trillingskring om het kringverlies op te vangen. Als er meer energie wordt teruggeleid dan nodig is, gaat dit overschot functioneren als een kleine zender die juist op deze frequentie uitzendt. Het kleinste verschil tussen de resonantie- en de ontvangst frequentie veroorzaakt als frequentieverschil de fluittoon.



Figuur 190. MOSFET in een schakeling met positieve terugkoppeling vanuit de source: iets minder goed.



Figuur 191. Het opbouwschema bij figuur 190.

In figuur 188 wordt voor het invoeren van de energie in de trillingskring gebruik gemaakt van de antennewikkeling. Daarom moet aansluiting 6 ook worden verbonden met aansluiting 1, anders hangt de wikkeling in de lucht. De puntjes naast aansluiting 1 en aansluiting 4 geven aan dat dit punten van gelijke fase zijn. Bij de vervaardiging van de spoel is erop gelet dat de wikkelzin juist is. Dus als de wisselspanning bij 4 positief is, dan zal 1 ook positief zijn. Alleen door deze wijze van aansluiten brengen we vanwege de emittertrap in onze schakeling een meekoppeling tot stand - als we andersom aansluiten, krijgen we een dempende negatieve terugkoppeling! Hier volgt de proef op de som:

136 We verwisselen de aansluitpunten 4 en 6 en stellen vast: er is geen sprake meer van positieve terugkoppeling als we aan de knop van P2 draaien!

Over het geheel genomen heeft nu minstens de insider begrepen: om de demping in een trillingskring op te heffen moet er een wisselspanning van diens resonantiefrequentie met de juiste hoogte en fase worden toegevoerd.

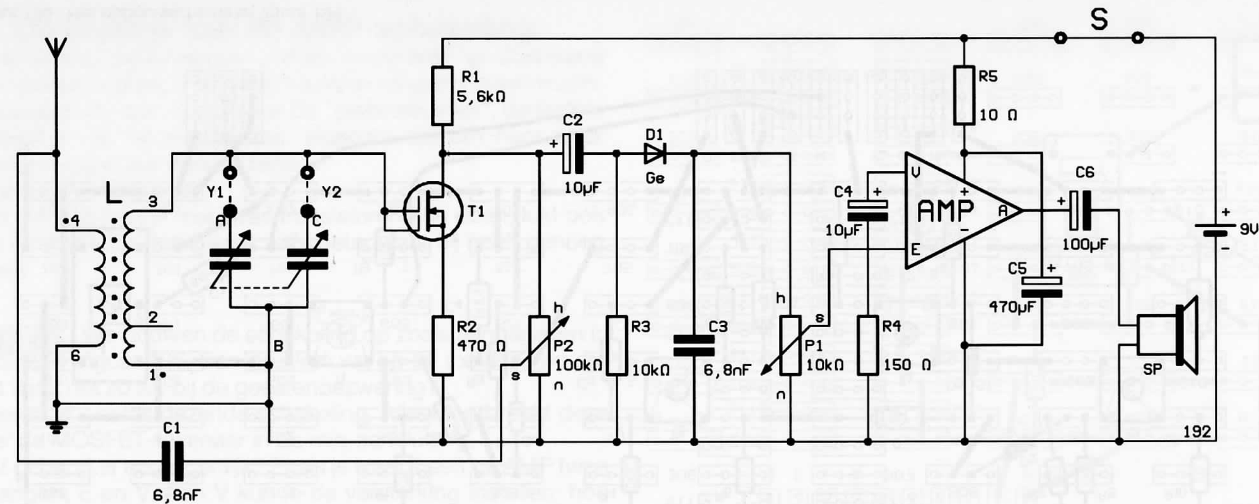
Bipolair en unipolair: gelijke monniken, gelijke kappen

Zoals we in hoofdstuk 14 hebben gezien, vloeit er bij de MOSFET geen ingangsstroom. Hij heeft dus een extreem hoge ingangsweerstand en zal er waarschijnlijk dan ook niet in slagen de trillingskring behoorlijk te dempen.

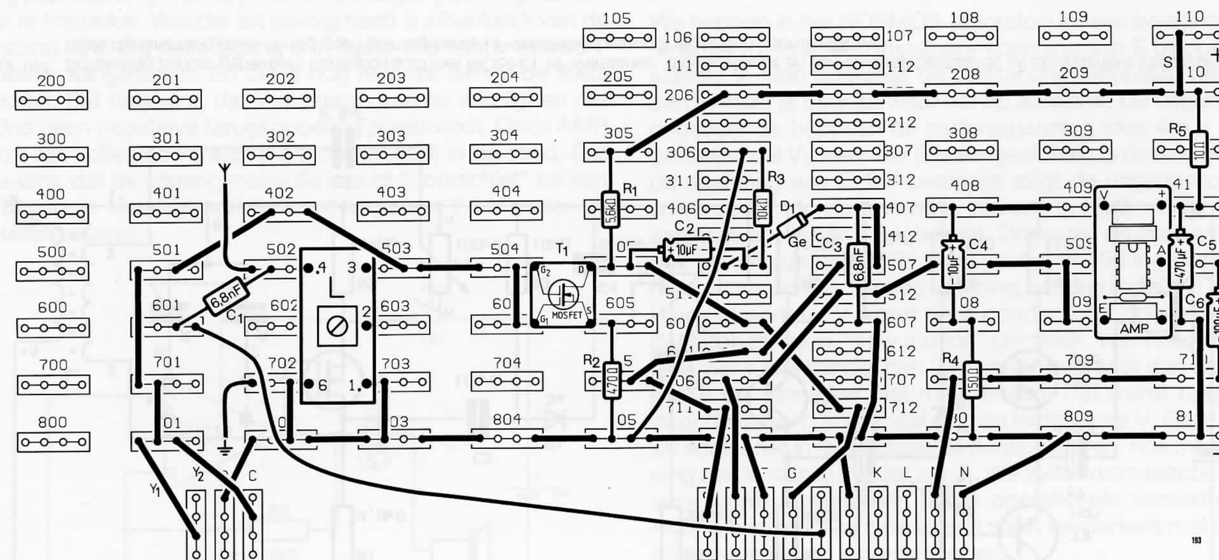
137 Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 191 gaan we hiervan het bewijs leveren - eerst nog zonder positieve terugkoppeling (*C*1 eruit trekken). Hoewel de trillingskring gewoon tussen gate en min-pool ligt, kunnen de ter plaatse te ontvangen zenders nog heel behoorlijk van elkaar worden gescheiden. Vervolgens nemen we *C*1 weer op in de schakeling en stellen voldaan vast: bij het opzoeken van zenders horen we de fluittoon, de zenders kunnen nog beter worden gescheiden - we hebben weer met succes de demping opgeheven.

Deze keer functioneert de meekoppeling zonder dat de teruggekoppelde spanning moet worden "omgedraaid", want de ingangsspanning aan de gate en de uitgangsspanning aan de source hebben dezelfde polariteit, ze zijn "in fase". Desondanks is deze oplossing voor zwakke radiostations niet helemaal bevredigend. Bovendien zet de positieve terugkoppeling nogal onverhoeds in.

138 Daarom passen we in figuur 192 de methode van de voorlaatste proef toe: de positieve terugkoppeling vindt plaats via de antennewikkeling. De daarvoor benodigde energie onttrekken we aan de drainaansluiting, dan klopt ook de fasetoestand weer. We zullen zien dat deze schakeling heel bevredigend functioneert.

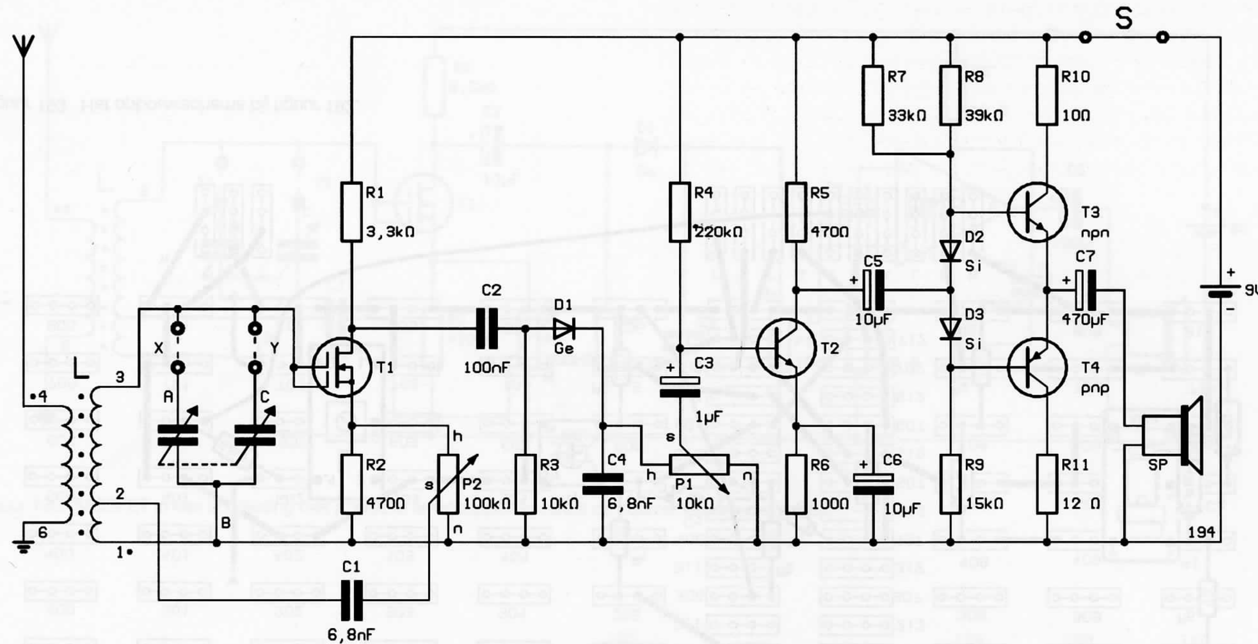


Figuur 192. Verbeterde versie van de schakeling in figuur 190: positieve terugkoppeling van de drain naar de antennewikkeling.

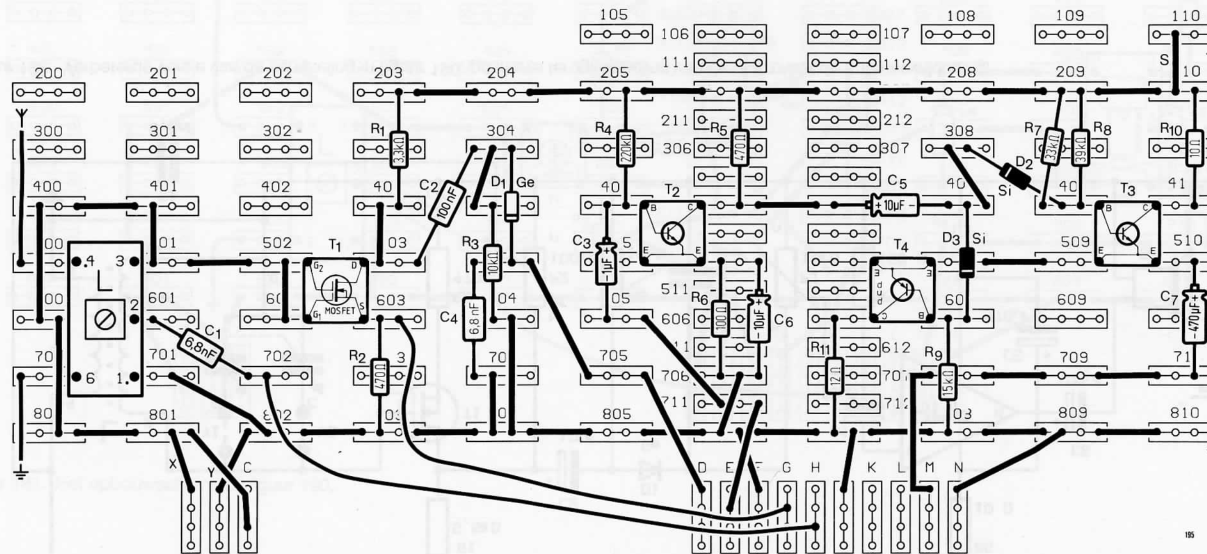


Figuur 193. Het opbouwschema bij figuur 192.





Figuur 194. Schakeling zonder geheimen: transistorradio met MOSFET HF-versterker, diodedetector en een eindtrap bestaande uit afzonderlijke transistoren, zoals die jarenlang (toen er nog geen geïntegreerde LF-versterker bestond) algemeen gebruikelijk was.



Figuur 195. Het opbouwschema bij figuur 194.

De "glazen" AMP

Als vanzelfsprekend werd bij al deze schakelingen gebruik gemaakt van de geïntegreerde LF-versterker om de spanning van de ontvanger om te zetten in vermogen voor de luidspreker. Maar hoe die versterker er van binnen uitziet weten we niet.

139 We bouwen daarom tot slot de ontvanger op volgens de aanwijzingen in figuur 194. *C*1 laten we voorlopig weg. Het LF-gedeelte ervan bestaat uitsluitend uit transistoren. Die vormen een *complementaire balanseindtrap* met een *stuurtransistor*. Dat lijkt al een beetje op onze AMP in actie, al is er blijkbaar maar één ingang. Toch kunnen we ook hier, net als bij de ingang V van de AMP, de versterking variëren. Om dit te bereiken verwijderen we de condensator *C*6 - en meteen wordt het geluid zachter, maar de klank is dan ook zuiverder. Voor een goede weergave zijn ook de beide diodes in de basistak van T3 en T4 verantwoordelijk. Die dienen om het "dode gebied" in de buurt van de diodespanning van de transistoren te ontwijken.

140 Als allerlaatste proef trakteren we ook dit apparaatje op een positieve terugkoppeling zoals aangegeven in figuur 190 (nu moet je *C*1 erin steken). Met deze schakeling is het de moeite waard om in de nachtelijke uurtjes eens een speurtocht te ondernemen op de middengolf. Eerst moeten de beide trimmers op de instelbare condensator helemaal worden uitgeschroefd (minimale capaciteit). Als je dat goed hebt gedaan kun je door de kunststof heen vaststellen dat er twee halfcirkelvormige plaatjes te zien zijn. De laatste "aan de onderkant" bereikbare zender (linker aanslag van de instelbare condensator!) kun je vinden door de spoelkern voorzichtig verder naar binnen te draaien. Daardoor verandert de inductiviteit van de spoel en dus ook de resonantiefrequentie van de trillingskring. De laatste zender "aan de bovenkant" vind je wanneer alleen de met een "O" gemerkte helft van de instelbare condensator is aangesloten.

17. De praktijk van de AMP-schakeling

In de laatste experimenten zorgde onze AMP er uitsluitend voor dat de zwakke LF-signalen werden omgezet in een krachtige sound. Hij was nu eenmaal de "eindversterker", de laatste schakel in de informatieketen. Hoogste tijd om hem weer zelfstandig aan het werk te zetten.

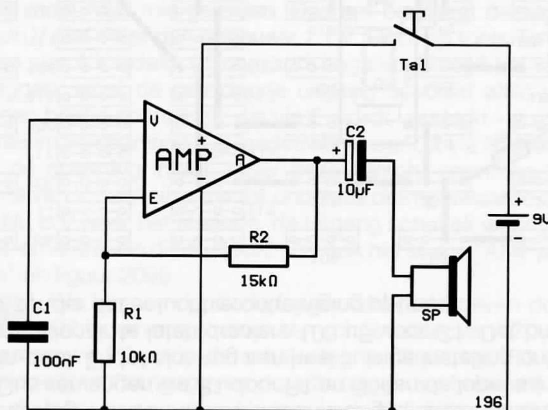
Klinken en knipperen

Veel van hetgeen je met twee transistoren kon doen, lukt ook met de AMP. En doorgaans zelfs beter want hij heeft genoeg power.

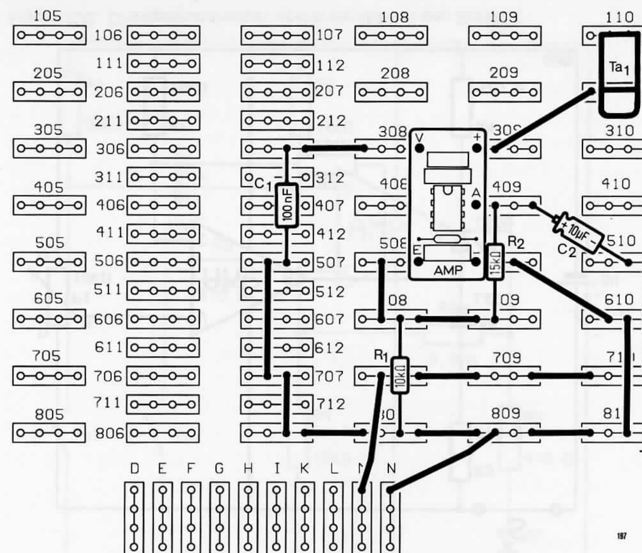
141 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 196. Dan drukken we op de toets. Klinkt dat niet bijna net zo als bij de geestenbezwering?

Inderdaad - het is dezelfde schakeling. Alleen ontbreekt deze keer de MOSFET-tovenaar in de min-aansluiting.

Wat gebeurt er nou eigenlijk? Zoals je weet, heeft de AMP twee ingangen, E en V. Aan V kun je de versterking instellen: hoe meer weerstand naar min, des te geringer is de versterking. Des te sterker is namelijk in het binnenste van de AMP de negatief teruggekoppelde weerstand vanuit de uitgang naar deze ingang. Bij de ingang E is precies het tegenovergestelde het geval. Die krijgt namelijk vanuit de uitgang een signaal om *mee te koppelen*. Wat dat tot gevolg heeft is afhankelijk van de toestand bij V. Op deze ingang is in figuur 196 echter een condensator aangesloten. En die is nog leeg als we op de toets drukken. Dat betekent, dat V praktisch aan de min ligt en dat er dus geen negatieve terugkoppeling plaatsvindt. Onze AMP werpt zijn volledige versterking (zowat 5.000) in de strijd. Dat betekent, dat de uitgang met volle kracht "doorschiet" tot aan de bovenste aanslag, praktisch tot ongeveer 1,4 V onder de batterijspanning.



Figuur 196. AMV met AMP: drie bouwelementen laten hem trillen.



Figuur 197. Het opbouwschema bij figuur 196.

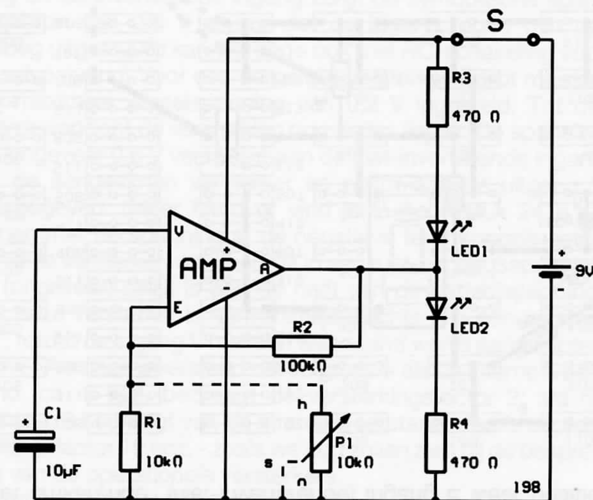
We hebben in het KOSMOS-laboratorium een beetje geëxperimenteerd - met een instelbare spanning aan E bij open aansluiting V. Dan bedraagt de versterking weliswaar niet meer dan 1, maar je begrijpt waar het op aankomt. De uitgang heeft ongeveer de helft van de batterijspanning (dus 4,5 V bij een batterij van 9 V), wanneer E is aangesloten op de min-pool. Als de spanning aan E 1 V bedraagt stijgt de uitgangsspanning ook met 1 V (de versterking is immers 1). Bij 3,1 V aan E is de aanslagwaarde van 7,6 V bereikt. Ongeveer op deze waarde is ook het aftakpunt van *R*1 en *R*2 in figuur 196 ingesteld. Daar moeten we echter ook nog rekening houden met *C*1. Door een kleine stroom uit V wordt deze condensator opgeladen. Ook dat hebben we in "slow motion" gemeten. Wanneer de spanning van V iets minder dan 0,6 V méér bedraagt dan die van E, kan E de versterker niet meer sturen. Dat wordt opgemerkt door de uitgang en die laat zich nu leiden door V. Deze ingang wil echter net in tegengestelde richting sturen: hoe meer spanning aan V, des te minder aan E. We zullen deze reactie in "zuivere" vorm tegenkomen bij de operationele versterkers. De AMP is een speciaal type van dit soort versterkers met bepaalde karakteristieke eigenschappen.

In ieder geval schakelt de uitgang terug tot bijna 0 V wanneer de hogere spanning aan V ten opzichte van E groot genoeg is. Dan krijgt *C*1 evenwel geen laadstroom meer - zijn lading vloeit weg in de richting van V. Daardoor blijft de uitgang nog een poosje op 0 V, totdat de spanning aan V ongeveer 0,6 V bedraagt. Dan komt E weer aan bod. Zoals we hierboven hebben gezien: 0 V aan E en tegelijkertijd minder dan 0,6 V aan V resulteert in de helft van de batterijspanning aan de uitgang. En dan begint het hele proces weer van voren af aan. (Zie ook figuur 206 en het stukje "AMP van binnen" verderop.)

142 We veranderen de voorwaarden door de weerstand van *R*2 te vervangen door eentje van 100 kΩ. Als je nu op de toets drukt hoor je een veel hogere toon - dat klinkt al bijna als het zoemen van een mug. Als je even nadenkt zul je begrijpen dat dat logisch is: E krijgt namelijk een kleiner gedeelte van de uitgangsspanning. Deze waarde komt aan *C*1 sneller tot stand, zodat het hele proces zich sneller voltrekt, met name in de laadrichting.

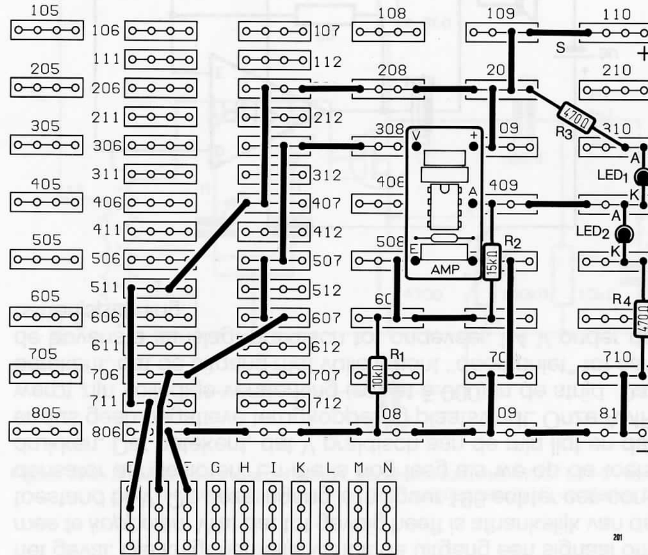
Op het beeldscherm van een oscilloscoop hebben we in het KOSMOS-laboratorium het spanningsverloop aan V en aan de uitgang (en dus ook aan E) bekeken. Dat ziet er uit zoals je logischerwijze mocht verwachten: aan V een "verbogen" *zaagtandtrilling* (zie ook hoofdstuk 24 - stijging eerst steil, dan alsmaar vlakker, daling korter - want het opladen van *C*1 duurt langer dan het ontladen. De uitgang en E vertonen een rechthoekige trilling met brede pieken (tijdens het opladen) en smalle dalen (tijdens het ontladen van *C*1).

143 Met 1 µF in plaats van 100 nF voor *C*1 (let op de juiste polariteit - de kant met de "groef" moet worden aangesloten op V!) komen we weer in het midden-tonengebied terecht. Omdat de capaciteit groter is duurt het langer voordat het kleine "stroompje" uit V de condensator heeft opgeladen! Op die manier wordt de kleinere omschakelspanning van de ingestelde waarde aan de aftakking dus weer gecompenseerd.



Figuur 198. *C*1 bepaalt het tempo: AMP als knipperlicht.

144 Met 10 µF voor *C*1 kunnen we bijna gaan motorrijden. In ieder geval heeft het geluid dat we nu horen wel iets weg van een motor. Alleen het gashandel ontbreekt nog. Dus vervangen we *R*1 door P1 en sluiten de loper aan op de min-pool. En tot slot nog een heel zuinige instelling om de motor stationair te laten draaien: 100 µF voor *C*1. Dat bromt lekker zonder dat er luchtverontreiniging optreedt.



Figuur 199. Het opbouwschema bij figuur 198.

145 Ook nu kunnen we overstappen van geluid op beeld als we de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 198 en de bruggen, aangegeven door de stippellijnen, nog even weglaten. Hoe langzamer onze AMP aan de uitgang omschakelt, des te fraaier kun je deze wissel omzetten in het knipperen van licht-emitterende diodes. Met de waarden zoals aangegeven in figuur 198 krijgen we daar voorlopig echter nog niets van te zien. Het lijkt alsof de beide licht-emitterende diodes gelijkmatig en continu licht geven. We veranderen daarom de waarde van *R*2 in 39 kΩ. Aha - nu flikkeren de diodes. Maar omdat dit ook nog geen echt knipperlicht is, verhogen we de waarde van *C*1 tot 100 µF. Nu is alles zoals het zijn moet. De diodes knipperen en lichten zonder lange tussenpauze afwisselend op en doven. Daar zorgt de hoge AMP-versterking wel voor.

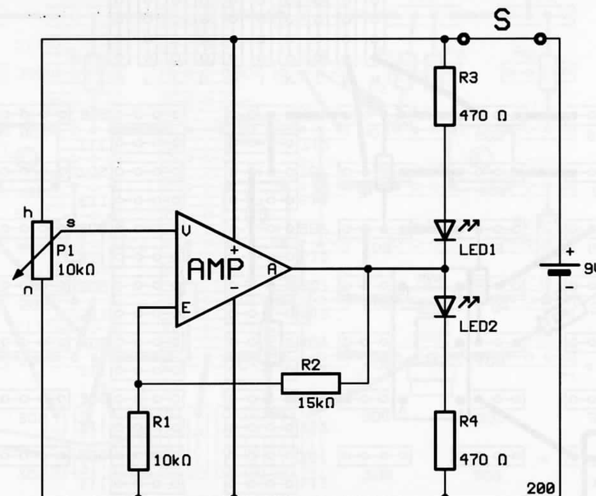
146 We vervangen *R*1 weer onze potmeter P1 en nemen nu ook de door stippellijnen aangegeven bruggen in de schakeling op (loper aansluiten op min). We draaien de knop van de potmeter langzaam op: de overgang van knipperen naar schijnbaar continu licht geven, dus het gebied van de door de optische traagheid veroorzaakte versmeltingsfrequentie, is goed te zien.

Geïntegreerde Schmitt

We hoeven aan de vorige schakeling nauwelijks iets te veranderen om de AMP ook als drempelwaardeschakelaar te kunnen gebruiken. Dat die mogelijkheid bestaat konden we al vermoeden bij het onderzoek naar de trillingsvoorwaarden.

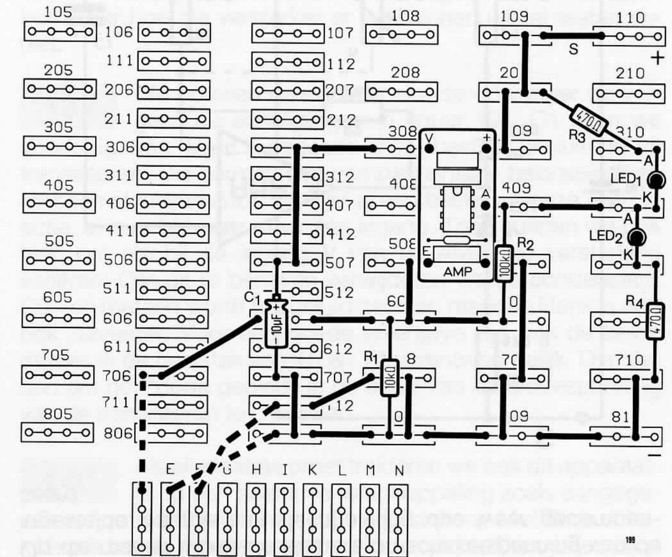
147 Zoals aangegeven in figuur 200 vervangen we de condensator *C*1 door onze potmeter P1. We kunnen nu de spanning aan V naar believen manipuleren. We draaien dus P1 van plus naar min en terug en houden daarbij de licht-emitterende diodes scherp in het oog. Eerst geeft LED2 licht. Logisch - V aan 0 V, dus maximale versterking. Positieve terugkoppeling van A naar E brengt de uitgang onmiddellijk op de bovenste aanslag. Deze toestand handhaaft zich op eigen kracht, omdat de uitgangsspanning via de aftakking van *R*2 en *R*1 invloed uitoefent op E. LED2 geeft dus licht.

We draaien nu P1 langzaam op. Al direct na het opdraaien dooft LED2 plotseling en licht LED1 op. Nu moeten we een heel eind terugdraaien voordat LED2 weer licht geeft. Aha - de hysteresis! Waarom? Wel, we hebben met P1 de spanning voor V ongeveer 0,6 V boven die van E getild. (Deze spanning bedraagt op grond van *R*1, *R*2 ongeveer 3 V.) Daardoor is de uitgang van zijn maximale spanning gekipt naar praktisch 0 V. Nu komt de spanning waarover V beschikt daar ruimschoots "bovenuit". Dus moeten we verlagen tot minder dan 0,6 V en dan neemt E de taak over: de lage spanning van ca. 50 mV aan de uitgang is voldoende, zodra V niet meer "overheerst", om de spanning aan de uitgang op te voeren tot het maximum.



Figuur 200. Drempelschakelaar: ook in de AMP zit een Schmitt!

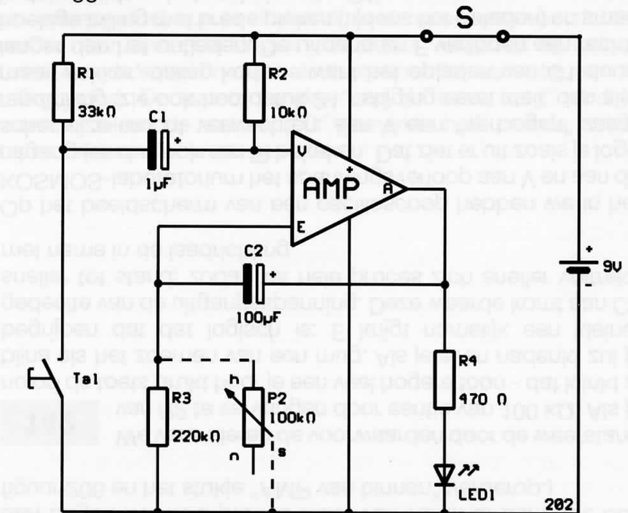
Vooruitlopend op het volgende hoofdstuk stellen we vast: het *(spannings-)verschil* aan de versterkeringangen wordt voor de "niet omkerende" (*niet-inverterende*) ingang E weer positief.



Figuur 201. Het opbouwschema bij figuur 200.

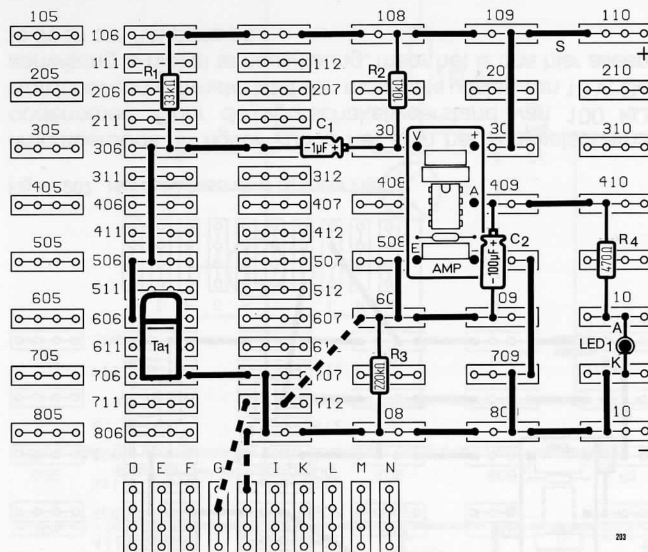
Monoflop en flip-flop - geen flop met de AMP!

Uiteraard kan hij dat ook. De manier waarop de spanningen aan E en V functioneren hoeven we nu zeker niet meer opnieuw uit te leggen.



Figuur 202. Monoflop met "dynastart": AMP met tijdfunctie.

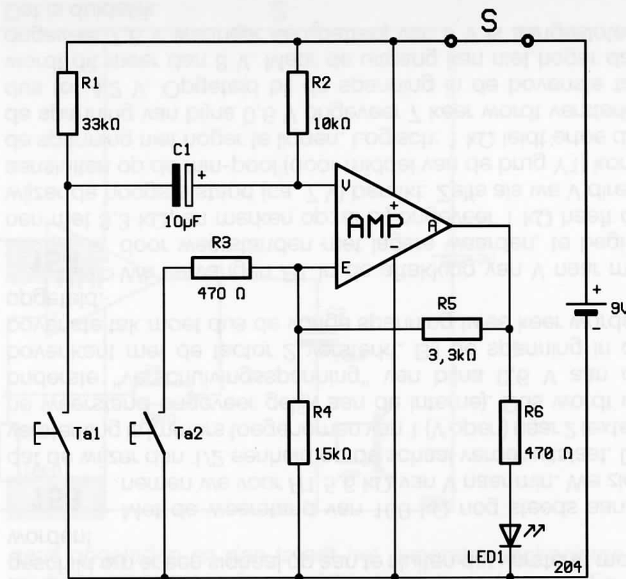
148 We bouwen de schakeling op zoals aangegeven in figuur 202 om ons ervan te overtuigen dat de AMP prima functioneert in de monoflop.



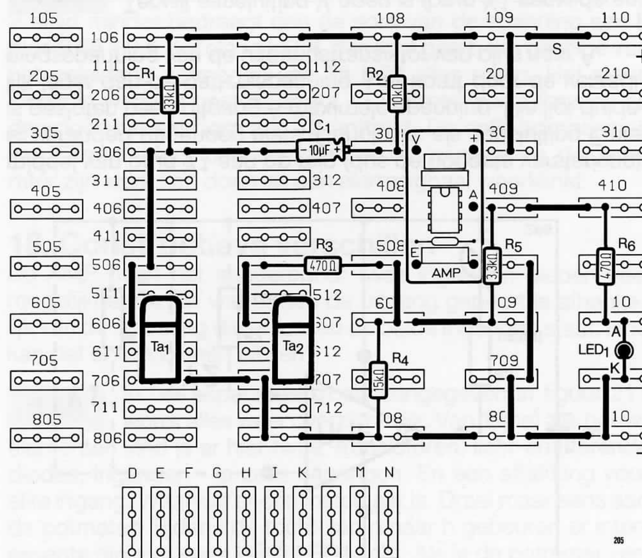
Figuur 203. Het opbouwschema bij figuur 202.

Sluit de batterij aan - LED1 is donker. Druk op toets Ta1 - LED1 licht op. Na ruim 10 seconden dooft ze weer. Daarmee hebben we de tijdfunctie bewezen. Als we nu even nadenken komen we tot de volgende conclusie: V krijgt een positieve voorspanning middels *R*2 en E is via *R*3 aangesloten op min. We hebben hier dus duidelijk te maken met een uitgangssituatie - de uitgang moet naar min geleiden. Daarom bedraagt de spanning aan V niet meer dan ongeveer 1,1 V. Door op toets Ta1 te drukken wordt V tijdelijk (*dynamisch*) negatief. E heeft het voor het zeggen, want de geleidende uitgang beschikt altijd wel over "een beetje spanning", die via E wordt versterkt - A gaat naar maximale spanning. De laadstroom voor *C*2 via *R*3 houdt aan E de spanning intact, maar deze verschil-spanning ten opzichte van V daalt al gauw tot onder de drempelwaarde van 0,6 V. Nu is V weer het sterkste, de uitgang schakelt weer om, de licht-emitterende diode dooft. (Zie ook het stukje "AMP van binnen" en figuur 206!)

149 We kunnen de diode langer laten licht geven door *C*2 te vervangen door een condensator van 470 µF. Dan nemen we P2 op in de schakeling in plaats van *R*3 (de door stippellijnen aangegeven draadbruggen aanbrengen) en sluiten de loper aan op min. Nu kun je de tijd dat je de diode licht wilt laten geven, instellen. Probeer het maar en controleer of het klopt!



Figuur 204. Kan elke toestand vasthouden: flip-flop AMP.



Figuur 205. Het opbouwschema bij figuur 204.

150 Door de schakeling van figuur 202 aan te passen en uit te breiden krijgen we de schakeling zoals aangegeven in figuur 204.

Het gaat erom nuttig gebruik te maken van twee toetsen: druk op Ta1 en LED1 licht op. Logisch - net als zoëven een dynamische start. Druk op Ta2 en de LED dooft. Je kunt elke toestand zo lang laten duren als je wilt. De schakeling flipt en flopt.

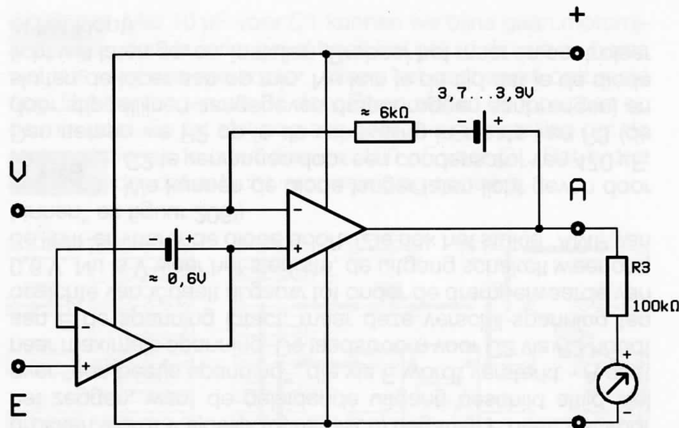
AMP van binnen

Figuur 206 vormt de overgang van de tot dusver onderzochte AMP-schakelingen naar de operationele versterkers ("OP's") die in de volgende hoofdstukken aan de orde komen. Het gebruik van een speciale markering is aan te bevelen zodat je naderhand deze informatie kunt opzoeken. Merk op dat de AMP maar één werkspanning nodig heeft, terwijl voor de proeven met de operationele versterker, die later aan de beurt komen, gebruik wordt gemaakt van twee batterijen van 9 V. Zoals je ziet leidt dit in vergelijking met de operationele versterker tot een paar eigenaardigheden van de interne schakeling van de AMP die voor een goede werking van de versterker noodzakelijk zijn. De spanningsopgaaf geldt voor een voeding van 9 V, terwijl de strooiing afhankelijk is van het exemplaar. Natuurlijk zitten er in de AMP geen echte batterijen. Maar de schakeling functioneert uiteindelijk zó, dat door deze "potentiaalverschuivingen" met E negatief A ongeveer de helft van de batterijspanning krijgt - dat komt net goed van pas voor een optimale uitsturing naar boven en naar beneden.

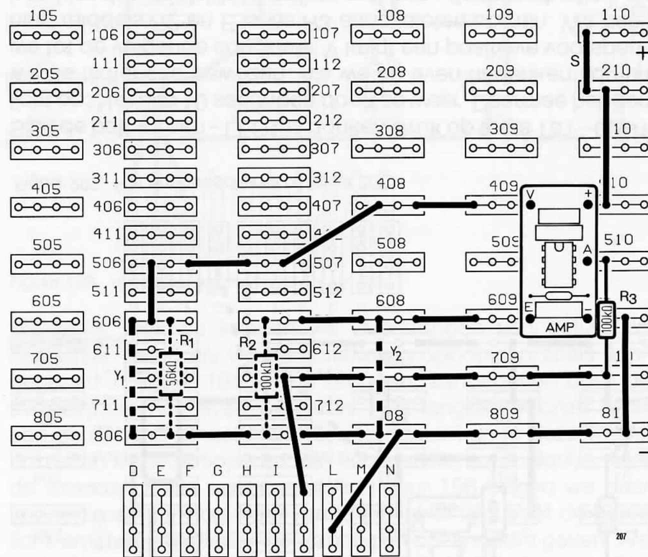
De versterker aan de ingang E is geschakeld als één-versterker" en heeft dus een hoge ingangsweerstand. In plaats van de hiervoor normaal toegepaste directe verbinding tussen zijn uitgang en de inverterende ingang zorgt de symbolische spanningsbron van 0,6 V ervoor dat de ingang tegen min ver genoeg uitgestuurd kan worden - ook met *RC*-schakeling voor wisselspanning! Voor een dergelijke versterker wordt meestal een maximale wisselspanning van 0,2 V ingesteld. Tot die waarde verloopt de versterking nog netjes lineair. De spanning van ongeveer 0,6 V verschijnt aan de niet-inverterende ingang van de aangesloten versterker en wordt aan de uitgang V weergegeven. (Meer hierover vind je in hoofdstuk 24 e.v.!)

Samen met de spanning in de negatieve terugkoppelingstak van deze versterker resulteert dit in een rust-uitgangsspanning die (ongeveer) gelijk is aan de helft van de batterijspanning. Ook deze versterker is aanvankelijk slechts een één-versterker", totdat de ingang V met een weerstand wordt aangesloten op min. Als deze weerstand net zo groot is als de interne weerstand (ca. 6 kΩ), bedraagt de versterkingsfactor 2; als hij slechts 1/9 bedraagt van de interne weerstand, dan is de versterkingsfactor 10 enz. - zoals we nog zullen zien bij de bespreking van de operationele versterkers.

Omdat het in dit stukje onvermijdelijk is dat we op de zaken vooruitlopen, spelen we nu nog even leentjebuur bij de hoofdstukken 19 en 27 en halen het meetinstrument uit onze expe-



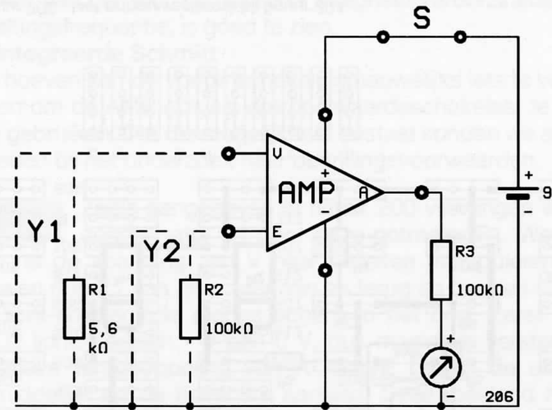
Figuur 206. AMP van binnen.



Figuur 207. Het opbouwschema bij figuur 206.

rimenteerdoos. In figuur 206 is het al in het schakelschema opgenomen. Door de voorschakelweerstand van 100 kΩ wordt het een voltmeter met een maximale uitslag van 10 V. De aanwijzing is niet al te nauwkeurig, maar het is ons hier alleen te doen om het principe.

151 We sluiten de batterij aan op de schakeling zoals afgebeeld in figuur 206 en houden het instrument in het oog: de wijzer slaat uit tot streepje 7. Nu sluiten we V door



middel van brug Y1 aan op min (dus de hoogste versterking): er verandert nagenoeg niets. Conclusie: als aansluiting E niet is gesloten heeft uitgang A maximale spanning. Die ligt duidelijk lager dan de batterijspanning. Dat komt door de verzadigingsspanning van de uitgangstransistor van plus naar A.

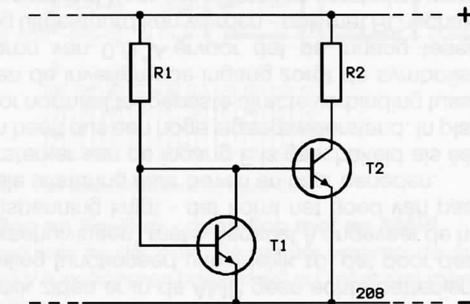
152 Terwijl aansluiting V open is (brug Y1 verwijderen), verbinden we aansluiting E door middel van brug Y2 met de min-pool. Aha - de wijzer loopt terug en blijft in de buurt van 4 staan. Dat is ongeveer de halve waarde van de batterijspanning. Nu vervangen we de brug van E naar min (Y2) door een weerstand *R*2 van 100 kΩ en stellen vast: aan de uitgang verandert er niets. Maar zo'n hoge weerstand is prima geschikt om er een signaal op aan te sluiten dat versterkt moet worden!

153 Met de weerstand van 100 kΩ nog steeds aan E nemen we voor *R*1 5,6 kΩ van V naar min. We zien dat de wijzer dan 1/2 eenheid op de schaal verder uitslaat. De versterking is immers toegenomen van 1 (V open) naar 2 (externe weerstand ongeveer gelijk aan de interne). Dus wordt de onderste "verschuivingsspanning" van bijna 0,6 V aan de bovenkant met de factor 2 versterkt. Bij de spanning in de bovenste tak moet dus de vorige spanning twee keer worden opgeteld.

154 We vervangen *R*1 in de aftakking van V naar min door weerstanden met lagere waarden, te beginnen met 3,3 kΩ, en merken op: al bij ongeveer 1 kΩ heeft de wijzer de hoogste stand (ca. 7 V) bereikt. Zelfs als we V direct aansluiten op de min-pool (door middel van de brug Y1) komt de spanning niet hoger te liggen. Logisch: 1 kΩ leidt ertoe dat de spanning van bijna 0,6 V ongeveer 7 keer wordt versterkt, dus tot 4,2 V. Opgeteld bij de spanning in de bovenste tak wordt dit meer dan 8 V. Maar de uitgang kan niet hoger dan ongeveer 7,6 V wanneer een batterij van 9 V is aangesloten. Dat is duidelijk.

Stromen in de spiegel

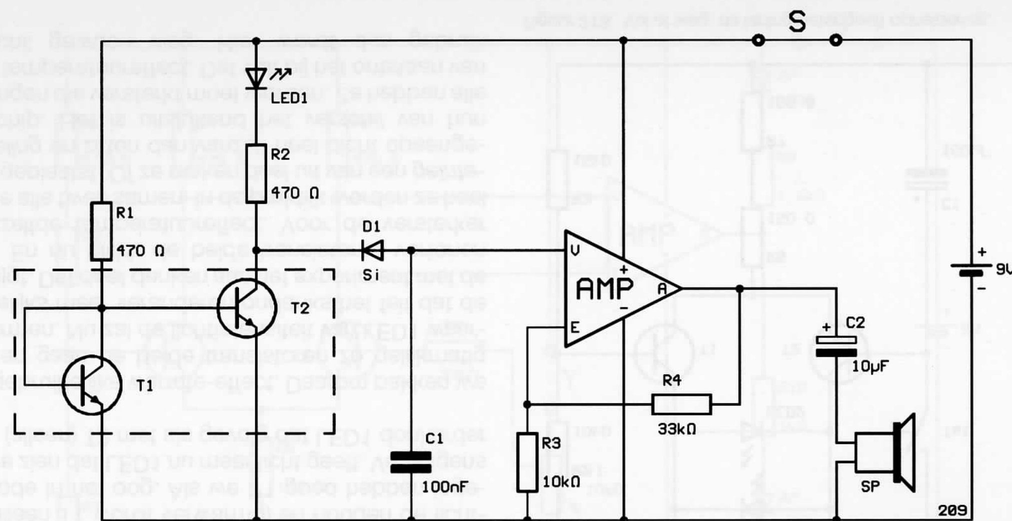
Reeds aan het eind van hoofdstuk 8 (figuur 87) hebben we geleerd: transistoren zijn, zoals alle halfgeleider-bouwelementen, gevoelig voor temperatuurschommelingen. De basis-emitterspanning daalt met maximaal 3 mV bij een temperatuurstijging van 1 graad. Een voorbeeld: een transistor die bij 0,60 V nog net spert, zal wanneer de temperatuur 3 à 4 graden stijgt, nog maar sperren tot 0,59 V. Anders uitgedrukt: de collectorstroom stijgt wanneer de transistor warmer wordt. Als je echter twee gelijke transistoren tegelijkertijd verwarmt (of afkoelt) en als die transistoren met elkaar zijn verbonden zoals aangegeven in figuur 208, dan gebeurt er in het gunstigste geval helemaal niets. Aangezien de stroom door T2 een "spiegelbeeld" is van die door T1, wordt een dergelijke rangschikking ook wel *stroomspiegel* genoemd. De goede temperatuureigenschappen van geïntegreerde schakelingen zijn hoofdzakelijk te danken aan dergelijke onderdelen van de schakeling.



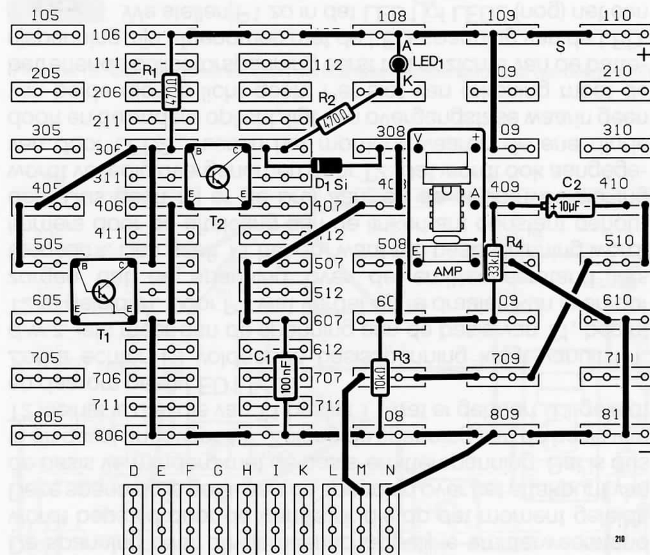
Figuur 208. De stroomspiegel, detail van een schakeling: heeft de effecten van temperatuurschommelingen in de hand.

Als je nu echter bijvoorbeeld alleen T1 verwarmt, dan is er van een evenwicht geen sprake meer. T1 onttrekt basisstroom aan T2, omdat zijn eigen basis-emitterspanning afneemt, en de spanning aan de collector van T2 neemt toe. Als je afkoelt gebeurt precies het tegenovergestelde.

155 Een praktische toepassing hiervan leren we kennen in het experiment zoals aangegeven in figuur 209. T1 functioneert als temperatuursensor buiten de montageplaat op een plaats waar hij heet kan worden (al is het beter als dat niet gebeurt). Als verbinding met de montageplaat gebruiken we twee-aderig "scheldraad". De afgestripte uiteinden worden om de emitter- respectievelijk om de basis- en collectoraansluiting gewikkeld. Een föhn die op deze "thermosensor" wordt gericht, zal het brandalarm al in werking zetten. "In het echt" begint het dan uit de sprinklerinstallatie te regenen.
Maar hoe gaat dat in z'n werk? Als je D1 en *C*1 nog even weglaat, kun je het stap voor stap doorgronden: E wordt door A via *R*4, *R*3 op ongeveer 1/4 van de uitgangsspanning gehouden.



Figuur 209. De stroomspiegel zorgt ervoor dat het functioneert: akoestisch alarm bij gevaar voor brand.



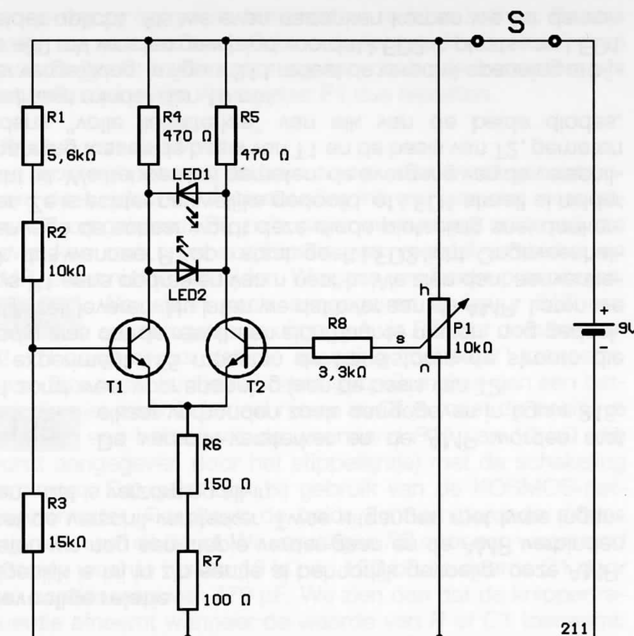
Figuur 210. Het opbouwschema bij figuur 209.

Wanneer V niet is voorzien van een schakeling bedraagt de spanning aan deze aansluiting 0,55 à 0,6 V meer dan die aan E zoals we intussen hebben gezien. De versterking is gelijk aan 1. Als je nu C1 aansluit, schakelt deze condensator de ingang V voor korte tijd door naar min, terwijl de versterking toeneemt tot 5.000. A raakt verzadigd (ongeveer 7,5 V). C1 wordt vervolgens opgeladen en dan treedt het generatormechanisme in werking dat we al in figuur 196 hebben leren kennen. En de luidspreker maakt het hoorbaar. Als je nu D1 in de schakeling opneemt valt het geluid weg, mits T1 nog niet te warm is geworden. Want nu "haalt" T2 de spanning van aansluiting V omlaag tot een waarde die gelijk is aan de som van de diodespanning van D1 en de (lage) verzadigingsspanning van T2. Het aftakpunt aan E is zo geconstrueerd dat de spanning aan V altijd minder bedraagt dan de som van de spanning aan E plus 0,55 à 0,6 V. Zolang LED1 dus licht geeft, ten gevolge van het geleidend vermogen van T2 blijft alles rustig. Het alarm wordt in werking gesteld zodra T1 warmer wordt (brand!) en daardoor basisstroom aan T2 onttrekt. De collectorspanning van T2 neemt fors toe waardoor V wordt vrijgegeven, de generator zijn werk kan doen en een alarmsignaal weerklinkt.

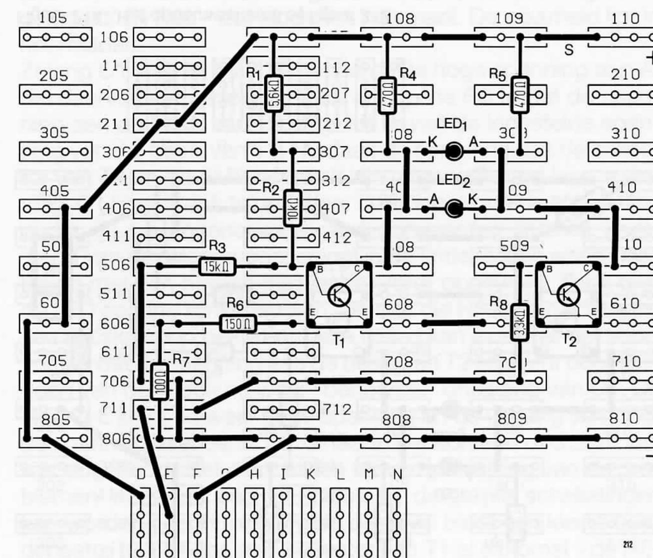
18. Constructieve verschillen

De AMP heeft het aangetoond: twee ingangen bieden veel mogelijkheden. En wat er aan de uitgang gebeurt is afhankelijk van de spanning die er *tussen* de beide ingangen staat. Hoe kan dat er van binnen uitzien?

156 In het experiment zoals aangegeven in figuur 211 wordt alles weer overzichtelijk. Van (bijna) alle bouwelementen vind je er hier twee: transistoren, licht-emitterende diodes, ingangen - ja zelfs uitgangen. En een aftakking voor elke ingang. Waarvan er één instelbaar is. Draai maar eens aan de potmeter! Tijdens de tocht van n naar h gebeuren er interessante dingen: eerst geeft LED1 licht. Als je de potmeter verder opdraait dooft de diode echter. In plaats daarvan licht - even later - LED2 op. Waarom?



Figuur 211. De verschil-versterker; hij beheerst de grondbeginselen van de toverij: twee keer fout wordt goed!



Figuur 212. Het opbouwschema bij figuur 211.

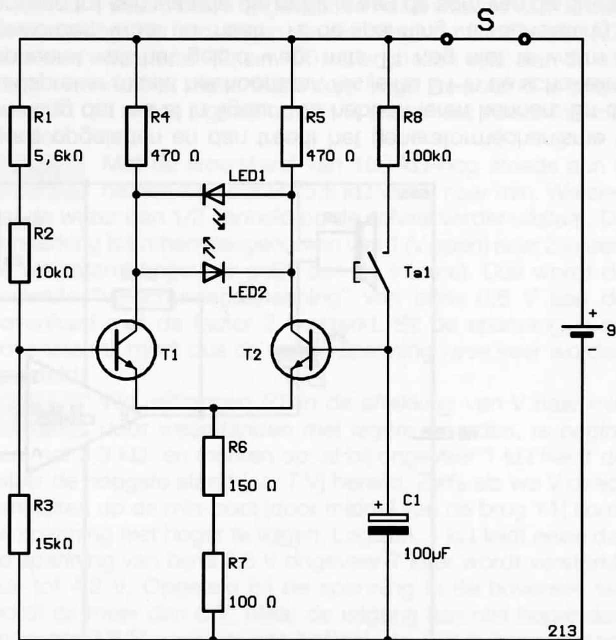
Wat we in figuur 211 zien is een *verschil-versterker*. Aangezien het hier transistoren van hetzelfde type betreft, hebben ze beide grotendeels dezelfde eigenschappen. De transistor waarvan de basis tegen min de grootste spanning krijgt geleidt. Omdat de basis van T1 is aangesloten op een vaste spanning (ongeveer de helft van de batterijspanning), kun je door middel van P1 beslissen wat er gebeurt.
Dit heeft wel wat weg van de Schmitt-trigger met transistoren. De spanning over de gemeenschappelijke emitterweerstand wordt bepaald door de transistor die op dat moment geleidt. Deze spanning is gelijk aan de spanning over het aftakpunt van de basis verminderd met de basis-emitterspanning. Dat is dus in dit geval ongeveer 4 V. Zolang de spanning aan de basis van T2 kleiner is dan die van T1 beslist T1 wat er gebeurt. T1 geleidt en daarom geeft LED1 licht.
Zodra echter T2 voldoende basisspanning krijgt vanuit P1, d.w.z. iets meer dan de spanning aan de basis van T1, begint T2 te geleiden. Door P1 wat verder op te draaien kun je ervoor zorgen dat de spanning over de emitterweerstand iets toeneemt. Dan geeft T1 het op, want zijn basisspanning wordt immers door de aftakking aan de linkerkant constant gehouden. Dus geeft hij er de brui aan, en de stroomvoorziening wordt volledig overgenomen door T2. Dat wordt ook aangegeven door LED2. Tussen het moment waarop de ene diode dooft en de andere oplicht, ligt een overgangsfase waarin geen van beide diodes licht geeft. Per slot van rekening moet de betreffende collectorspanning eerst ten opzichte van de batterijspanning zijn afgenomen met de LED-spanning van de LED.

157 We stellen P1 zo in dat LED1 of LED2 (nog) net een beetje licht geeft. Laten we bijvoorbeeld LED1 nemen. Dan verwarmen we T1 met een föhn (waarbij we een stukje karton tussen T1 en T2 plaatsen om ervoor te zorgen dat ook werkelijk alleen T1 wordt verwarmd) en houden de lichtemitterende diode in het oog. Als we P1 goed hebben ingesteld kunnen we zien dat LED1 nu meer licht geeft. Vervolgens verwarmen we (alleen) T2 met als gevolg dat LED1 donkerder wordt.
Dat is dus het gebruikelijke warmte-effect. Daarom pakken we weer de föhn en gaan de beide transistoren zo gelijkmatig mogelijk verwarmen. Nu zal de lichtintensiteit van LED1 waarschijnlijk nauwelijks meer veranderen ondanks het feit dat de temperatuur stijgt. Dat doet denken aan het experiment met de stroomspiegel. En nu blijkt: de beide transistoren vertonen (ongeveer) hetzelfde temperatuureffect. Voor de versterker gebruiken we ze alle twee samen. In de praktijk worden ze heel dicht bij elkaar geplaatst. Of ze maken deel uit van een *geïntegreerde schakeling* en zitten dan vanzelf heel dicht opeengepakt op een chip. Het is uitsluitend het *verschil* van hun ingangsspanningen die versterkt moet worden. Ze hebben alle twee hetzelfde temperatuureffect. Dat valt bij het ontstaan van spanningsverschil gewoon weg. Hier wordt dus gebruik gemaakt van een procédé dat in de wetenschap vaak wordt toegepast: zorg ervoor dat een fout twee keer wordt gemaakt en trek de beide uitkomsten van elkaar af. Resultaat: geen fout. Geen probleem!

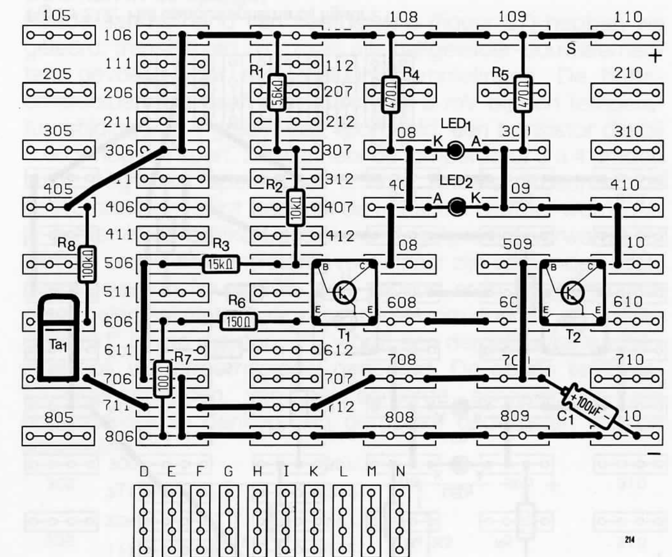
Niveaumeter voor ladingen

Als je elke trap van de verschil-versterker afzonderlijk bekijkt zul je vaststellen dat hij aan de emitterkant erg veel weg heeft van een emittervolger. En die heeft zoals je weet een hoge ingangsweerstand - ruwweg berekend stroomversterking maal emitterweerstand. In onze schakeling komt dat neer op ongeveer 100 kΩ. Dat volstaat om door middel van condensatorladingen ervoor te zorgen dat er voldoende tijd is voor het doen van waarnemingen.

158 Vervang de potmeter door een "tijdafhankelijke aftakking"; 100 kΩ vanuit plus, 100 µF naar min (figuur 213). Druk op toets Ta1 en wacht tot LED2 oplicht. Eerst is T2 gesperd. Dus geeft LED1 licht. In de tussentijd wordt *C*1 via *R*8 opgeladen. Daardoor bereikt de spanning van *C*1 na een poosje de waarde van de spanning over het aftakkingspunt van T1: LED1 dooft. LED2 heeft echter pas voldoende spanning wanneer T2 ver genoeg is geopend. Zodra deze diode oplicht, weet je dat de lading van *C*1 meer bedraagt dan de helft van de batterijspanning en in ieder geval meer dan spanning over het aftakkingspunt van T1. Als je Ta1 weer loslaat dooft LED2. Even later geeft LED1 weer licht en dat betekent: de lading van *C*1 bedraagt nu minder dan de helft van de batterijspanning. Door zijn lekstroom zal hij spoedig helemaal zijn ontladen.



Figuur 213. Vol of leeg: de ladingmeter geeft opheldering.

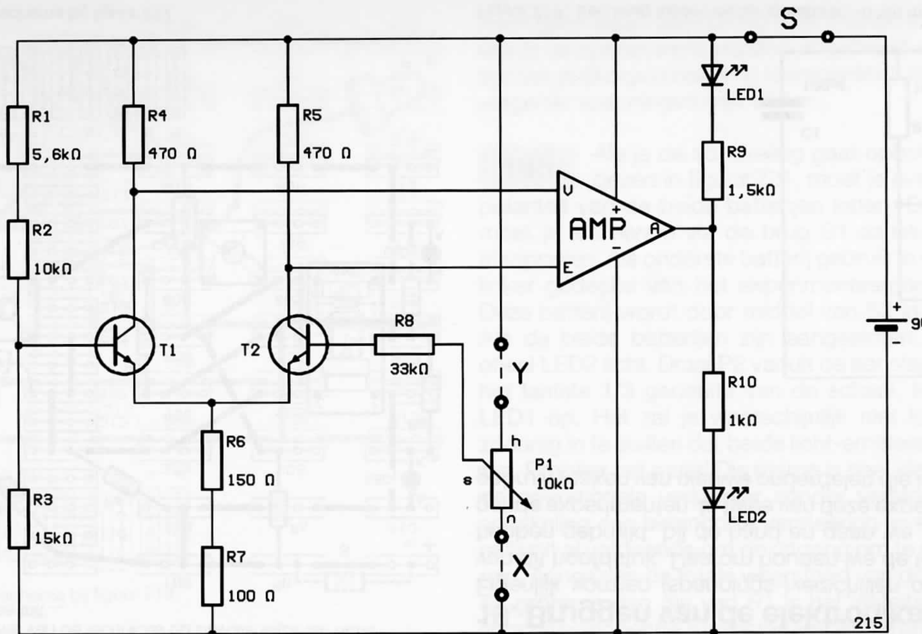


Figuur 214. Het opbouwschema bij figuur 213.

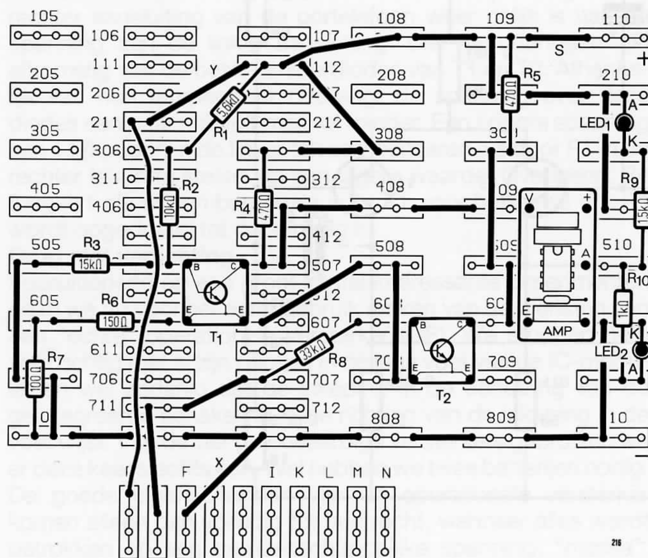
Gevoelige relatie

Eigenlijk is hij in z'n eentje al behoorlijk gevoelig, onze AMP. Laten we nog een stapje verder gaan en de AMP verbinden met de verschil-versterker. Twee uitgangen met twee ingangen - dat is verzorging all-in.

159 De verschil-versterker en de AMP worden met elkaar verbonden zoals aangegeven in figuur 215. P1 zorgt weer voor spanning (aan de basis van T2).
In experiment 155 moesten de transistoren de stroom die nodig was om de resultaten zichtbaar te maken, nog gedeeltelijk zelf leveren. Nu laten we dat over aan de AMP. Laten we dus P1 eens opdraaien van n naar h. We zien dan: aanvankelijk, dus wanneer P1 op n staat, geeft LED2 licht. Ongeveer halverwege de schaal wordt deze diode plotseling snel donkerder. Ze is echter nauwelijks gedoofd, of LED1 straalt al helder licht uit. We hebben het gemeten: de overgang van de verschilspanning tussen de basis van T1 en de basis van T2, gemeten tijdens "volle lichtsterkte" van elk van de beide diodes, bedraagt minder dan 10 mV.
Ter vergelijking: in figuur 211 moest de verschil-spanning al bijna 400 mV worden gewijzigd voordat LED2 in plaats van LED1 helder oplicht. Als we even nadenken komen we tot de vol-



Figuur 215. Zeer hoge sensibiliteit dankzij werkverdeling: uiterst gevoelige comparator voor temperatuurverschillen.



Figuur 216. Het opbouwschema bij figuur 215.

gende conclusie (zie hoofdstuk 17): de AMP heeft amper 0,6 V nodig tussen V en E om te kunnen sturen. De licht-emitterende diodes tussen de collectoren daarentegen hebben een LED-spanning van bijna 2 V die overwonnen moet worden.

160 Nu wordt ook onze temperatuurproef "effectiever". We stellen P1 zo in dat de beide licht-emitterende diodes tegelijkertijd een (zwak) licht uitstralen. Hoe kan dat eigenlijk? Wel - er is in deze schakeling zelfs een moment dat de AMP-uitgang hierop helemaal geen invloed heeft. Namelijk dan wanneer de uitgangsspanning precies gelijk is aan de waarde die de aftakking LED1 - *R*9 - *R*10 - LED2 op punt A oplevert. Om ons hiervan te overtuigen trekken we gewoon de AMP uit de klemveren. Vervolgens pakken we eerst T1 en daarna T2 met duim en wijsvinger vast. Dan blijkt: als we T1 verwarmen geeft LED2 meer licht, als we T2 verwarmen heeft LED1 de overhand. Tot slot nemen we nog eens föhn ter hand: als de beide transistoren tegelijkertijd en gelijkmatig worden verwarmd houden de diodes elkaar in evenwicht.

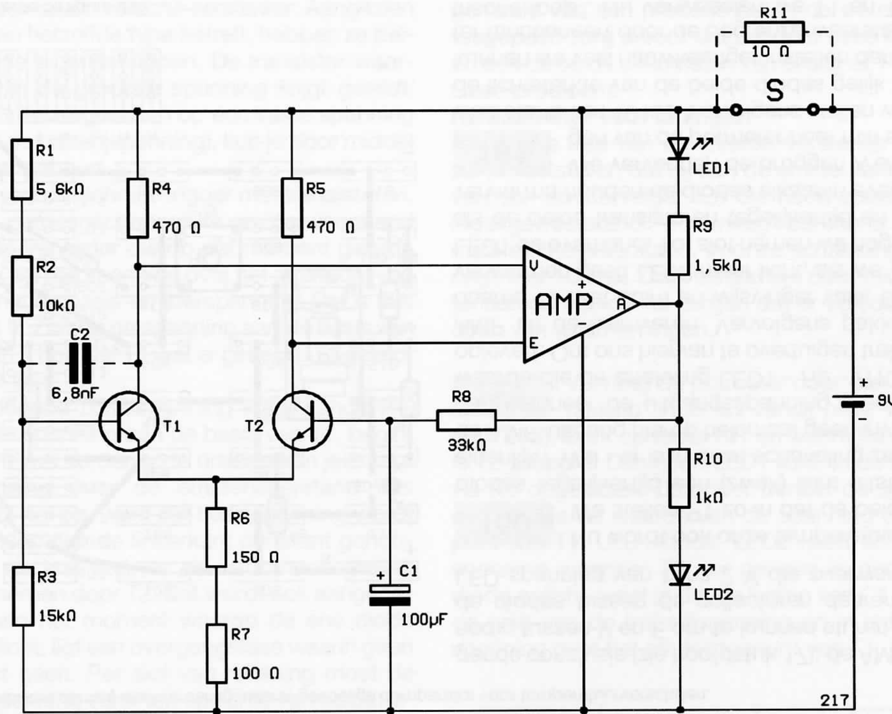
161 We vervangen de bruggen X en Y in de aansluitingen van de potmeter naar min en plus elk door een weerstand van 10 kΩ. Vervolgens stellen we P1 weer zo in dat de lichtsterkte van de beide diodes gelijk is. We zien dan: nu kunnen we veel nauwkeuriger instellen dan zoëven, de potmeter functioneert door de begrenzerweerstanden als een "elektrische loep". Nu verwisselen we T1 en T2 en wachten een poosje om ze op gelijke temperatuur te laten komen. Daarna stellen we vast: het evenwicht in de lichtsterkte is verschoven want de basis-emitterspanning van de beide transistoren is niet helemaal gelijk. We moeten P1 dus bijstellen.

Effecten van de sterkte

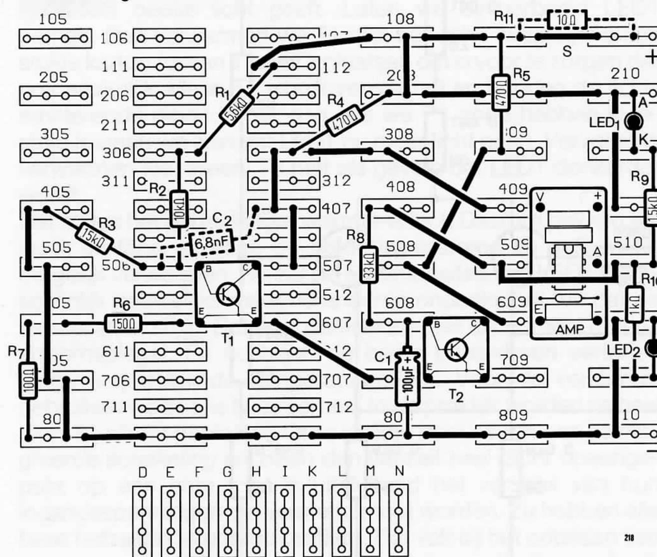
Een probleem waar de technicus vaak mee wordt geconfronteerd doet zich voor, wanneer alles trilt wat juist niet moet trillen. Of omgekeerd. Bij zo'n grote versterking zoals wij die opwekken met onze combinatie van verschil-versterker en AMP, is dat niet te vermijden. We gaan een beetje provoceren:

162 We leiden zoals aangegeven in figuur 217 een spanning van de uitgang A via *R*8 naar de basis van T2. *C*1 zorgt ervoor dat die spanning "beheerst" toeneemt. Voor deze proef kun je het beste gebruik maken van een batterij die niet meer helemaal nieuw is. Of je moet de positieve pool van een batterij via de weerstand *R*11 van 10 kΩ (die wordt aangegeven door het stippellijntje) met de schakeling verbinden. Dat geldt ook bij gebruik van de KOSMOS-nettransformator. Resultaat: de beide licht-emitterende diodes knipperen om de beurt. We vervangen *R*8 door een weerstand met een waarde tussen 10 kΩ en 100 kΩ en daarna *C*1 door een condensator van 470 µF. We zien dan dat de knipperfrequentie afneemt wanneer de waarde van *R* of *C*1 toeneemt.

163 Nu bevestigen we tussen de basis en de collector van T1 de condensator *C*2 van 6,8 nF (stippellijntje). Dan geven de beide LED's licht, het knipperen is opgehouden. We hebben dus met behulp van een heel kleine David (6,8 nF) het effect van de grote Goliath (100 µF) ongedaan gemaakt! (?) Nou - dat klopt niet helemaal. De waarheid ligt in het midden.
Zolang *C*1 leeg is, blijft T2 gesperd. De hoge spanning aan A, die daarvan het gevolg is, laadt *C*1 op via *R*8 totdat de spanning aan de basis van T2 stijgt tot boven de ingestelde spanning van de basis van T1. Nu daalt de spanning aan de collector van T2 en de AMP schakelt zijn uitgang A naar lage spanning. *C*1 begint zich te ontladen. Daardoor komt de schakeling onder de bovengenoemde randvoorwaarden (interne weerstand van de stroomvoorziening) in de kritieke fase waarin een trilling met een hogere frequentie wordt opgewekt. Toch blijft de LED continu licht uitstralen. Je kunt die HF-trilling echter op een oscilloscoop bekijken. Deze trilling kan evenwel niet voorkomen dat de spanning aan de basis van T2 afneemt door toedoen van deze ook nu weer "beheerste" ontlading van *C*1. De ingang E krijgt nu weer hoge spanning en de uitgang verhoogt de spanning eveneens. Dit is heel in het kort een overzicht van wat er gebeurt. Het dient alleen ter verduidelijking van de problemen waarmee een technicus bij dergelijke schakelingen kan worden geconfronteerd. In dit geval biedt een kleine condensator tussen basis en collector van T1 al uitkomst - de HF-trilling is verdwenen, maar de diodes knipperen nu dan ook niet meer.



Figuur 217. De nachtmerrie van de technicus op zinvolle wijze ten nutte gemaakt: alles trilt ...



Figuur 218. Het opbouwschema bij figuur 217.

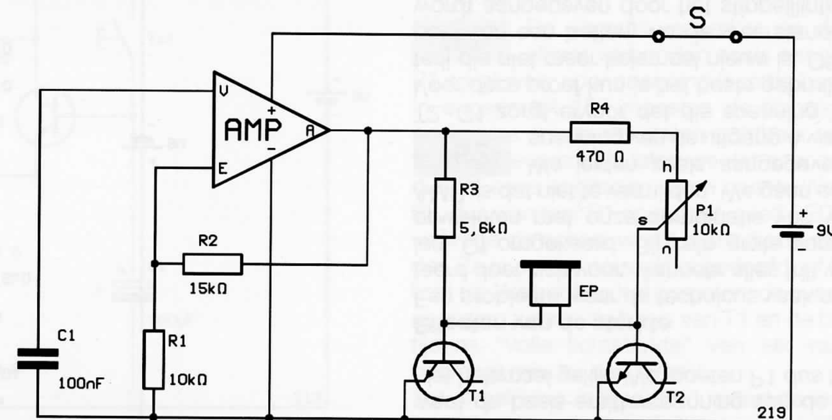
19. Bruggen van de elektronika

Eigenlijk vormen (spannings-)verschillen ook het onderwerp van dit hoofdstuk. Daarom houden we de föhn die we zoëven hebben gebruikt, bij de hand en gaan we verder met de volgende experimenten. In twee van deze experimenten zullen we gebruik maken van nieuwe onderdelen die in een later stadium nog uitgebreid aan de orde zullen komen. Dit wordt dus een voorproefje van wat ons nog te wachten staat.

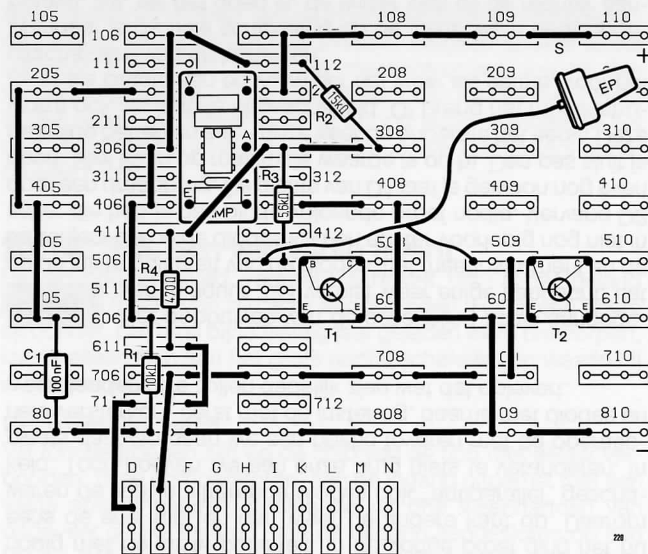
Geluid opgewekt door koude

Als je de oortelefoon in je oor stopt kun je naar tamelijk kleine toonfrequente wisselspanningen luisteren. Dus ook naar verschil-spanningen tussen twee punten van een bijzondere soort schakeling, de *brugschakeling*.

164 We rusten de AMP als toonfrequentiegenerator uit met een schakeling zoals aangegeven in figuur 219. In de uitgangskring daarvan bouwen we een dergelijke brugschakeling in. P1 wordt eerst ingesteld op maximale waarde (s op n). Na het aansluiten van de batterij hoor je in de oortelefoon een geluid. Draai P1 vervolgens langzaam op naar h. Dan zul je horen dat het geluid langzaam wegsterft. Als P1 ongeveer het midden van de schaal heeft bereikt, is het helemaal stil. Als je de potmeter verder opdraait komt het geluid terug. Stel de potmeter weer in op *minimale* geluidssterkte. Pak vervolgens T2 vast met duim en wijsvinger en - je zult horen dat het geluid steeds sterker wordt. Zoek daarna de nieuwe minimale geluidssterkte op. Die ligt nu lager op de schaal van P1. Dan ga je T1 verwarmen. En wat blijkt? Het minimum bevindt zich nu hoger op de schaal van P1. Je zult nog een paar keer moeten "bijstellen", totdat de beide transistoren weer dezelfde temperatuur hebben aangenomen.
Als je de positie van de potmeter tijdens het doelbewuste verwarmen en afkoelen van een van de transistoren kalibreert, krijg je een *akoestische thermometer,* waarmee je evenwel alleen *temperatuurverschillen* kunt meten. Maar hoe gaat dat nou in z'n werk? De toonfrequentiegenerator vormt de signaalbron voor de maas bestaande uit *R*3 en T1 aan de linkerkant en *R*4, P1 en T2 aan de rechterkant. Tussen de verbin-



Figuur 219. Een brug tussen de temperaturen: in het midden heerst stilte!



Figuur 220. Het opbouwschema bij figuur 219.

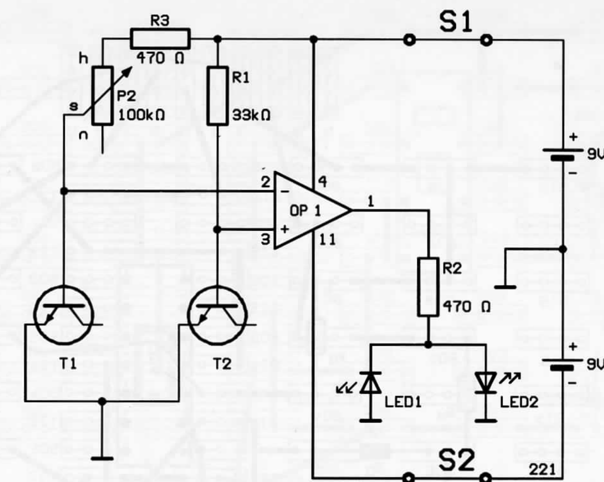
dingspunten ervan vormt de oortelefoon een “brug”. Zo wordt ook de gehele schakeling genoemd. Wanneer er in de oortelefoon een spanningsverschil optreedt, is de brug *ontstemd*. Je kunt ze weer in *evenwicht* brengen door de instelbare rechter tak van de brug zodanig te veranderen dat de spanning aan de rechter aansluiting van de oortelefoon weer gelijk is aan de spanning aan de linker aansluiting. Die veranderingen zijn afkomstig van de basis-emitterdiodes van T1 en T2. Afhankelijk van hun temperatuur bedraagt de spanning over deze diodes een paar millivolt meer of minder. Een hogere spanning aan T1 (kouder) in de linker tak compenseren we door P1 in de rechter tak in te stellen op een lagere waarde. Overigens: *R*4 fungeert als stroombegrenzer voor T1 voor het geval dat P1 wordt opgedraaid tot de aanslag h.

Brug met verlichting

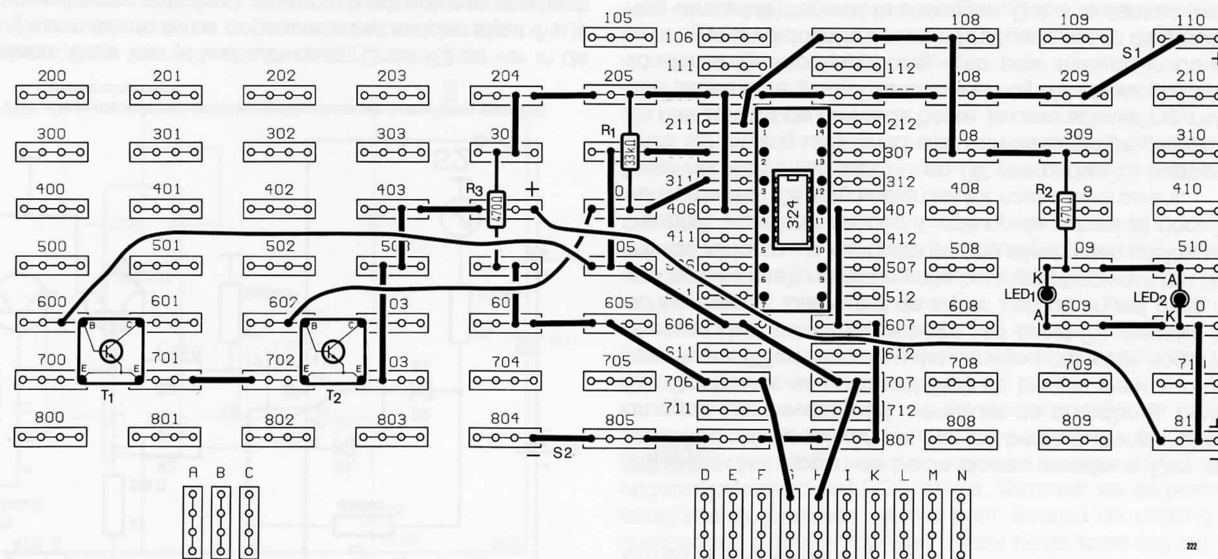
Vooruitlopend op een groot aantal interessante experimenten gaan we nu voor het eerst gebruik maken van de diensten van een “echte” operationele versterker (OP). We stoppen hem voorzichtig met al zijn pootjes in de lege voet van de IC-module, en wel zodanig dat de inkeping in de behuizing van de geïntegreerde schakeling in de richting van de inkeping in de voet wijst. Van de vier gelijkwaardige versterkers gebruiken we er deze keer slechts één. Wel hebben we twee batterijen nodig. De goede eigenschappen van de operationele versterker komen alleen dan volledig tot hun recht, wanneer alles wordt betrokken op een gemeenschappelijke spanning, “massa”. Dat is de horizontale streep aan het eind van de verbindingsdraad van de beide batterijen. De operationele versterker zelf heeft geen eigen aansluiting voor massa. In de volgende proef wordt de operationele versterker gebruikt als een heel gevoelige vergelijkingsschakeling (*comparator*; zie hoofdstuk 24). Hij vergelijkt spanningen met elkaar.

165 Als je de schakeling gaat opbouwen zoals aangegeven in figuur 221, moet je even heel goed op de polariteit van de beide batterijen letten. De bovenste batterij moet je als eerste via de brug S1 aansluiten en als laatste afkoppelen. Als onderste batterij gebruik je de batterij die in het linker gedeelte van het experimenteerpaneel is ingebouwd. Deze batterij wordt door middel van S2 in- en uitgeschakeld. Als de beide batterijen zijn aangesloten, geeft ofwel LED1 ofwel LED2 licht. Draai P2 vanuit de aanslag n langzaam op. In het laatste 1/3 gedeelte van de schaal, tussen s en h, licht LED1 op. Het zal je waarschijnlijk niet lukken de potmeter zodanig in te stellen dat beide licht-emitterende diodes donker zijn. Probeer het maar! Die marge is heel klein. Dat komt omdat de operationele versterker zonder versterkingsbegrenzende schakeling een belangrijke versterking levert. Dan is een paar millivolt al voldoende om de uitgang om te polen van plus naar min. Aangezien de totale weerstand van de potmeter aanzienlijk groter is dan die van *R*1 is het instelbereik groot genoeg voor uiteenlopende transistortemperaturen.

Houd de instelling waarbij LED1 nog net licht geeft, vast en raak T1 heel even aan met je vinger. De kleine verandering van temperatuur die dit tot gevolg heeft, is al voldoende! LED1 dooft en LED2 licht op. Hoe meer je T1 hebt verwarmd, des te langer blijft de schakeling in deze toestand. Raak daarom vervolgens even T2 aan. Dan is LED1 weer aan de beurt om op te lichten. Een aardig spelletje waarmee je je verbaasde publiek kunt voorgoochelen dat er spoken aan het werk zijn - door handoplegging, aanblazen, aantippen met een beetje aftershave (door verdamping van de alcohol die deze bevat, ontstaat koude) enz. Je voorstelling kan niet meer stuk.



Figuur 221. Een nieuwkomer op de commandobrug: de OP registreert en vergelijkt.



Figuur 222. Het opbouwschema bij figuur 221. Hier zijn alle punten in de schakeling met massasymbool met elkaar verbonden.

Laten we maar weer eens kijken hoe we dit kunnen verklaren. de brugschakeling bestaat uit *R*3 (als beveiliging voor T1) en P2 alsmede uit de basis-emitterdiode van T1 aan de linkerkant en uit *R*1 en T2 (basis-emitterdiode) aan de rechterkant. De batterijvoeding bedraagt in totaal 9 V. P2 dient om bij te stellen. Voor de wijzigingen zorgen de temperatuurgevoelige transistoren. De operationele versterker beschikt over de inmiddels vertrouwde twee ingangen, eentje die de spanning aan de uitgang "omkeert", *inverteert*, en eentje die alles laat zoals het is (de *niet-inverterende*). De eerste is voorzien van een plussymbool, de tweede van een min-symbool. Het is afhankelijk van de polariteit van de verschil-spanning die er tussen deze twee staat, wat de uitgang zal doen. In dit opzicht bestaat er een grote mate van overeenkomst met de AMP. Alleen betrekt die alles op de min-pool van één batterij. En ook het binnenste ervan is iets anders van samenstelling.

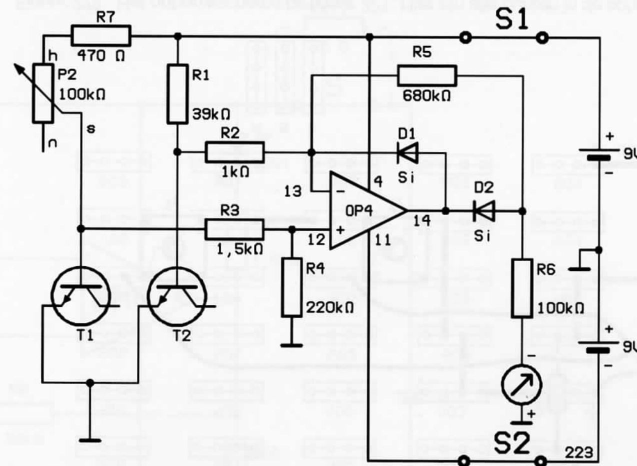
Als de verschil-spanning tussen de ingangen van de operationele versterker aan de niet-inverterende ingang positief is, geeft de uitgang een ten opzichte van *massa* van de schakeling hoge positieve spanning af. Dit wordt aangegeven door het feit dat LED2 oplicht. En omgekeerd. Einde van de eerste les in OP-kunde.

Meten is weten

Ook in deze paragraaf komen er veel nieuwe dingen ter sprake. Om te beginnen het "aanlokken". Bij de voortdurende wisselingen tussen een draaibare spoel met wijzer en een permanente magneet gebeurt ongeveer hetzelfde als in de oortelefoon en de luidspreker: een spoel waar stroom doorheen vloeit beweegt zich in een magnetisch veld. Aangezien de wijzer slechts in één richting kan uitslaan, hebben we gelijkstroom nodig met de juiste polariteit. In de vorige proef ging het nu eens de ene kant en dan weer de andere kant op. Daarom waren de licht-emitterende diodes ook "antiparallel" geschakeld. Toch hoeven we aan onze brug niets te veranderen. In plaats daarvan gaan we een beetje toveren met de operationele versterker - eerst met de instelling, daarna met diodes en weerstanden. We zullen dadelijk zien wat dat oplevert.

166 Het opbouwen van de schakeling zoals aangegeven in figuur 223 vereist weer enige aandacht. Let op de juiste polariteit van de diodes, het meetinstrument en de batterijen. De beide diodes komen echter voorlopig nog niet in actie; die heb je pas bij de volgende proef nodig. Vervang D2 door een draadbrug. De plaats van D1 laat je gewoon nog even open. Stel P2 in op maximale waarde (s op h). Dan pas sluit je de beide batterijen aan - deze keer de onderste het eerst. Deze wordt ook als laatste uitgeschakeld. Of breng het meetinstrument als laatste aan en verwijder het weer als eerste, vóór het uitschakelen van de batterijen.

Wanneer je de hele schakeling op de juiste wijze hebt opgebouwd, zal, als het goed is, de wijzer vlak bij de rechter aan-

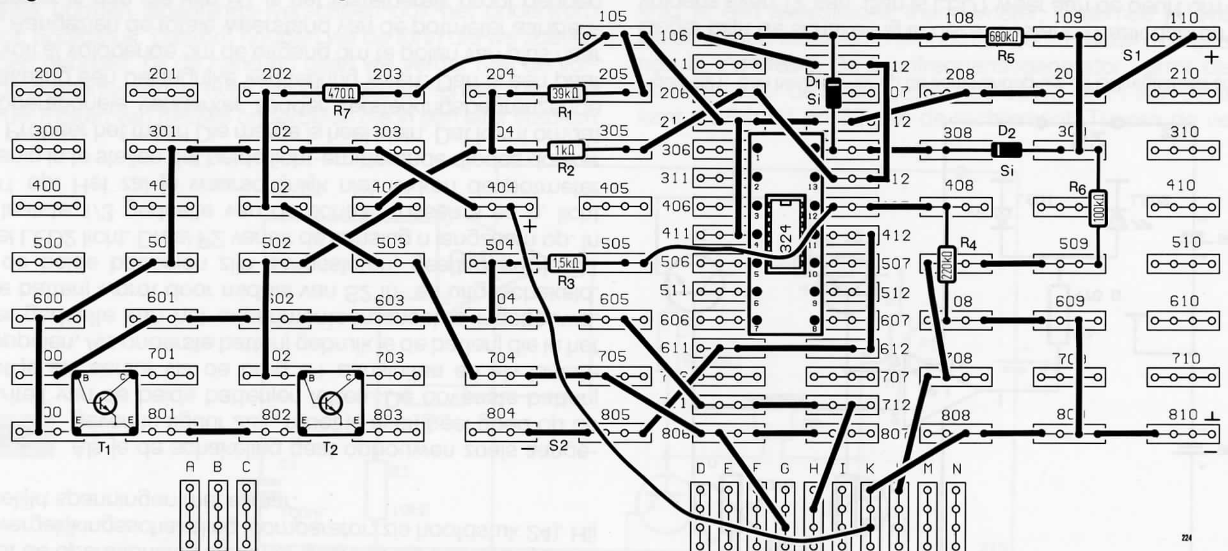


Figuur 223. De juiste richting: precisie-gelijkrichter als beveiliging voor het meetinstrument.

slag staan. Daar kun je wat aan doen. Draai P2 zo ver in de richting van n dat de wijzer ongeveer in het midden staat. Nu is de brug weliswaar ontstemd, maar dat heeft ook een praktisch nut. Raak T1 maar eens aan met je vingers: de wijzer zal uitslaan naar rechts. En als je T2 aanraakt, gaat de wijzer naar links. Maar terwijl hij aan de rechterkant blijft staan nog vóór de maximale uitslag is bereikt, zou hij aan de linkerkant het liefste nog een heel eind verder willen gaan. Helaas is dat onmogelijk vanwege de mechanische blokkering. Voordat de wijzer zich rond deze aanslag gaat oprollen, kun je beter iets ondernemen om dit te voorkomen.

167 Nu mogen de beide diodes meedoen. Dus: maak één pool van elk van de beide batterijschakelaarbruggen los, bevestig D1, verwijder de draadbrug, bevestig D2. Controleer de polariteit! Sluit de batterij weer aan. Draai vervolgens P2 zo ver naar n dat de wijzer net ietsje hoger komt te staan dan nul. Draai bij wijze van proef P2 duidelijk in de richting van h. Daar trekt de wijzer zich nu vrijwel niets meer van aan, hij heeft nagenoeg alle belangstelling voor het "linker milieu" verloren. Je kunt hem nu nog alleen laten uitslaan (naar "rechts", waar nog genoeg ruimte op de schaal is) door T1 te verwarmen of T2 af te koelen (of P2 naar n te draaien).

Door het inbouwen van D1 en D2 (alsmede *R*5) hebben we onze schakeling uitgebreid met een *enkelzijdige gelijkrichter*. En niet zomaar de eerste de beste. In deze schakeling met een operationele versterker functioneert hij als *ideale gelijkrichter* zonder enige diodespanning. Een paar millivolt in de juiste richting is al voldoende om aan de uitgang het (in dit geval zelfs nog versterkte) "effect" te verkrijgen. Dat is te danken aan D2. Haar diodespanning wordt door de operationele versterkeruitgang gecompenseerd. (Die diodespanning is gelijk aan het verschil tussen de spanning van de operationele versterkeruitgang en die van de uitgang van de schakeling.) De uitgang van de schakeling ligt achter D2, waar het meetinstrument is aangesloten. D1 vormt slechts een baan voor de stroom die bij



Figuur 224. Het opbouwschema bij figuur 223.

tegengestelde polariteit van de ingangsspanning in omgekeerde richting uit de uitgang wil vloeien, hetgeen anders wordt verhinderd door D2. Voor het meetinstrument zou hij dan immers in de verkeerde richting vloeien. Een insider met inzicht in dergelijke processen word je op z'n laatst wanneer je het nog volgende hoofdstuk over operationele versterkers onder de knie hebt.

20. NE 555: een veelzijdig talent

Hij versterkt, vergelijkt, vertraagt, schakelt, trilt - al naargelang je gebruik maakt van zijn acht aansluitingen. Het is een echte allrounder. Dat hij al bijna twintig jaar geleden werd ontworpen, kun je alleen zien aan het grote aantal schakelingen waarin hij wordt toegepast.

Het roemrijke vijftal

Vijf functiegroepen zijn op de chip van de 555 met elkaar verbonden: twee comparatoren, aan de ingang uitgerust met een vaste spanningsdeler, bestaande uit drie weerstanden van ongeveer gelijke waarde, aan de uitgang aangesloten op een RS flip-flop waarvan de inverterende reset-ingang naar buiten is gevoerd; aan de uitgang van de flip-flop bevinden zich twee versterkers - eentje met een balanstrap (die kan dus zowel stroom leveren als "afnemen"), de andere met een open collector (kan dus alleen stroom "afnemen", voorzover hij actief is). Die functioneert tussen ongeveer 4,5 V en 16 V.

De aansluitingen worden als volgt aangeduid: OUT = balansuitgang (3); DIS = ontlaaduitgang (7) ("discharge", dat is die met de open collector); R = reset-ingang (4); CTRL = controlespanning (5) (inverterende ingang van de bovenste comparator, ingesteld op 2/3 van de batterijspanning); K1 = diodespanningsingang (6) (niet-inverterende ingang van de bovenste comparator, reageert dus vanaf 2/3 van de batterijspanning); K2 = trigger-ingang (2) (inverterende ingang van de onderste comparator; de niet-inverterende ingang van deze comparator is intern via weerstanden ingesteld op 1/3 van de batterijspanning en reageert dus vanaf 1/3 van de batterijspanning).

Figuur 225 laat zien hoe de interne verhoudingen in de 555 zijn geregeld. Daardoor zul je een en ander gemakkelijker kunnen begrijpen. De spanningsdeler, bestaande uit 3 weerstanden van 5 kΩ, is overigens een van de belangrijkste trucs in de 555: hoe de werkspanning ook is aangelegd, de comparatoren reageren altijd bij 1/3 respectievelijk 2/3 van deze spanning. Dat heeft tot gevolg dat je bij de meeste toepassingen nauwelijks afhankelijk bent van de hoogte van de werkspanning.

De 555 als trigger: springt over alle drempels

Als je te maken hebt met twee comparatordrempels, ligt het voor de hand de 555 als trigger te gebruiken.

168 In de schakeling aangegeven in figuur 226 blijven twee aansluitingen onbezet. We gaan ook deze keer weer de ingangs-uitgangsreacties onderzoeken. We verdraaien P2 en stellen dan vast: vanaf de onderste aanslag (n) tot ongeveer 1/3 vóór de bovenste aanslag (h) geeft LED2 licht. De stroom vloeit dus uit de uitgang naar buiten. Dan verandert de situatie plotsklaps en fungeert LED1 als indicator. Nu vloeit de stroom dus de uitgang in, naar de min-pool. Wanneer we nu P2 terugdraaien, wordt de begintoestand pas hersteld bij 1/3 vóór de onderste aanslag: dan geeft LED2 weer licht.

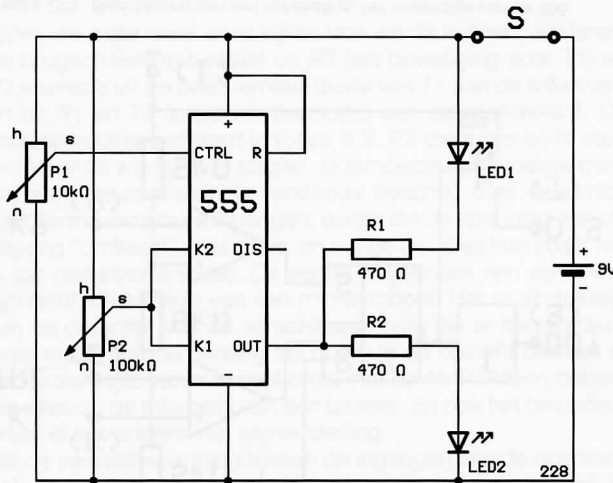
Figuur 225. Bezichtiging van een schakeling: het inwendige van de 555.

Figuur 226. Slimme schakeldrempels: trigger met stabiele condities.

Figuur 227. Het opbouwschema bij figuur 226.

Als we op zoek gaan naar een verklaring en daartoe figuur 225 eens wat nader bestuderen, worden onze vermoedens bevestigd: de onderste comparator is blijkbaar verantwoordelijk voor het eerste instelbereik van P2 vanuit de onderste aanslag. Laten we even memoreren wat we al hebben geleerd. De verschil-spanning aan de ingangen van K2 (de interne, niet-inverterende ingang in de verdeler en de naar buiten geleide aansluiting no. 2) is voorlopig positief, dus de spanning aan de uitgang ervan ook. En dientengevolge ook de set-ingang van de flip-flop. De flip-flop wordt geset en de uitgang OUT komt onder hoge spanning te staan. De waarde van die spanning bedraagt bijna 1,5 V minder dan de waarde van de werkspanning. Vandaar dat LED2 licht geeft.

Wanneer de ingangsspanning hoger wordt dan de ingestelde waarde van K2 (1/3 van de batterijspanning), wordt S negatief. Aangezien S en R echter uitsluitend op hoge spanning reageren ("positieve logica"), gebeurt er voorlopig nog niets. Pas wanneer de spanning oploopt tot 2/3 van de batterijspanning, komt er beweging in de schakeling. Nu stijgt de spanning aan K1 (aan de niet-inverterende ingang) tot boven de spanning van de tweede weerstand van de spanningsdeler en schakelt diens uitgang de ingang R naar hoge spanning. Als R onder hoge spanning staat, wordt er gereset. De uitgang OUT wordt negatief geleidend en LED1 oplicht. Wanneer we de potmeter terugdraaien, bereiken we het punt waarop de uitgang van comparator 2 de flip-flop weer onder hoge spanning zet, pas bij *U*/3 aan comparator 2. Daarna verloopt het proces weer zoals hierboven beschreven.

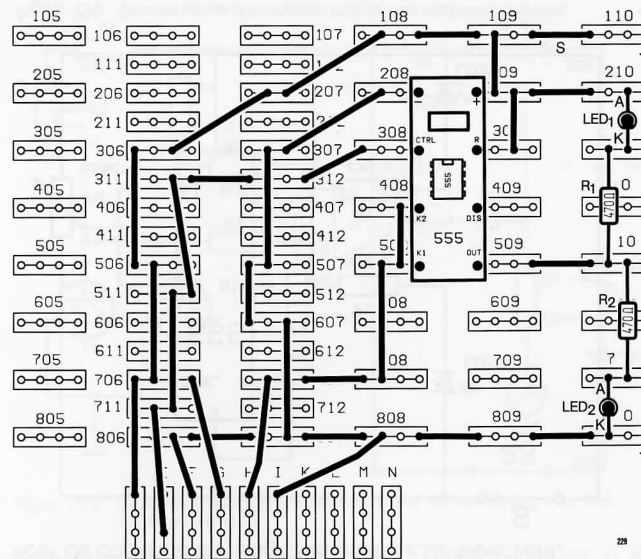


Figuur 228. Voor het beheer van de drempels: timer-control-tower met P1.

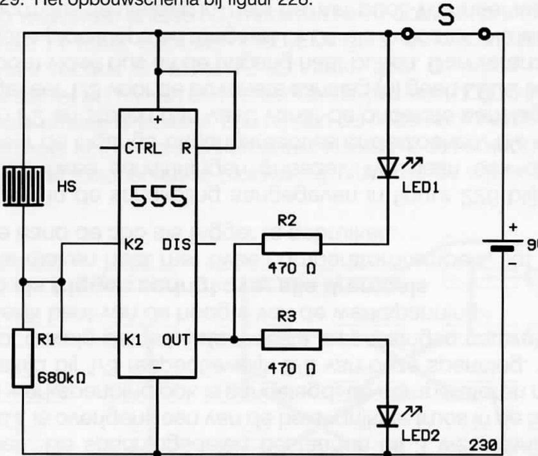
We hebben hier dus te maken met een trigger, waarvan de hysteresis gelijk is aan 1/3 van de werkspanning. Dat is voorwaarde voor de voornaamste toepassing van deze schakeling als *timer* (tijdgever) met stabiele eigenschappen. Daar zullen we later nog op terugkomen. Ook zullen we schakelingen leren kennen waarbij de triggerdrempels en de hysteresis worden aangepast voor bepaalde doeleinden.

169 We veranderen nu de polariteit van de aansluiting R van plus in min en stellen vast: LED1 blijft licht geven ongeacht de instelling van P2. We onthouden dus: wanneer R wordt aangesloten op de min-pool, schakelt hij de uitgang naar lage spanning en wordt de flip-flop gereset.

170 We breiden onze schakeling uit met een tweede potentiometer (P2) zoals aangegeven in figuur 228. P2 wordt eerst ingesteld op 1/3 van het instelbereik, dus in de buurt van min. Vervolgens gaan we weer met behulp van P2 op zoek naar de schakelpunten. En wat blijkt? Deze punten liggen nu lager en dichter bij elkaar. Nu draaien we P2 op tot in het bovenste 1/3 gedeelte (dus tot in de buurt van h). Als we nu de instelling van P1 veranderen, blijkt dat de drempels lager liggen en verder uit elkaar.
We onthouden: zoals blijkt uit figuur 225 is de CTRL-aansluiting het punt waarop de spanningsdeler de batterijspanning tot 2/3 vermindert. Dat is het referentiepunt voor K1. De helft van deze spanning vinden we terug aan K2 als referentiespanning. Wanneer de polariteit van de spanning aan CTRL van buitenaf wordt gewijzigd ("gecontroleerd") heeft dat ook zijn uitwerking op de schakeldrempels. De 555 kan dus via vier aansluitingen worden gestuurd. Dat is mede een verklaring voor de grote verscheidenheid van zijn toepassingsmogelijkheden.



Figuur 229. Het opbouwschema bij figuur 228.



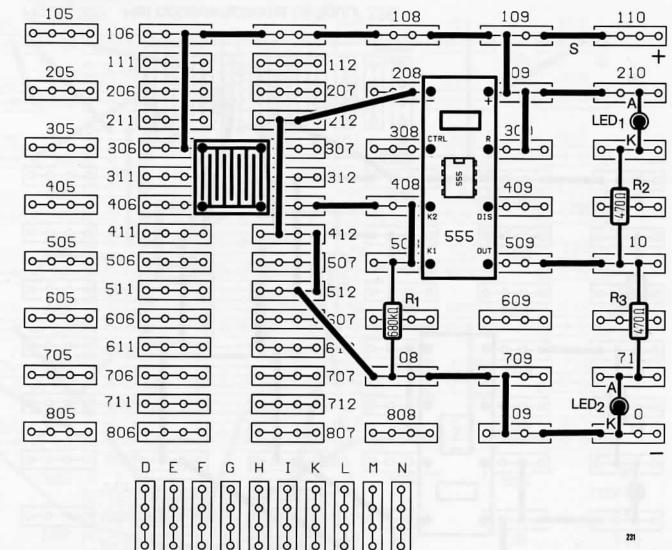
Figuur 230. Een vleugje vochtigheid: de Schmitt-trigger in de klimatologische test.

171 We gaan meteen nog een handig apparaatje bouwen waarbij de trigger goed van pas komt (figuur 230). Zoals je je wellicht nog kunt herinneren hebben we eerder al eens geëxperimenteerd met een hygro-sensor die we met een laagje keukenzout hadden bedekt. Deze sensor komt nu in plaats van de "bovenste" weerstand van P2 in figuur 226. In plaats van de "onderste" weerstand wordt *R*1 met een waarde van 680 kΩ in de schakeling opgenomen. Als de lucht droog is, geeft LED2 licht, want de sensor heeft dan een heel hoge weerstand. De spanning aan het knooppunt K1/K2 bedraagt minder dan 1/3 van de batterijspanning. Even op de sensor ademen is genoeg om ervoor te zorgen dat LED2 dooft en LED1 oplicht. Totdat de sensor weer droog is. Waarom de schakeling zo reageert, hebben we al in figuur 226 gezien. En waar kun je zo'n schakeling voor gebruiken? Nou, bijvoorbeeld voor een luchtbevochtiger die niet door middel van een LED, maar door een relais wordt in- en uitgeschakeld. We raden je aan hiervoor gebruik te maken van de KOSMOS-nettransformator. Verderop zullen we nog meer fraaie voorbeelden geven van een dergelijke besturing.

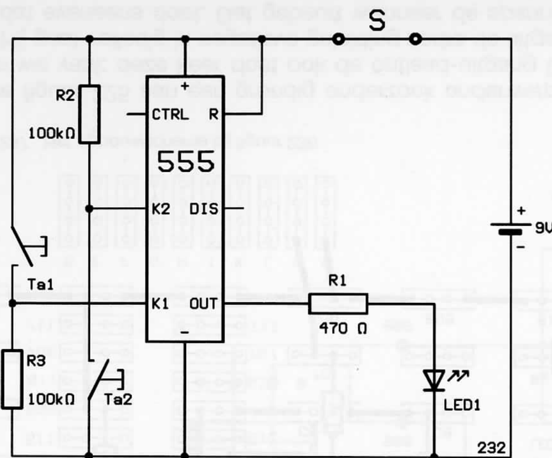
Flip en flop in de 555

In het volgende experiment laten we de flip-flop functie van de 555 te voorschijn komen.

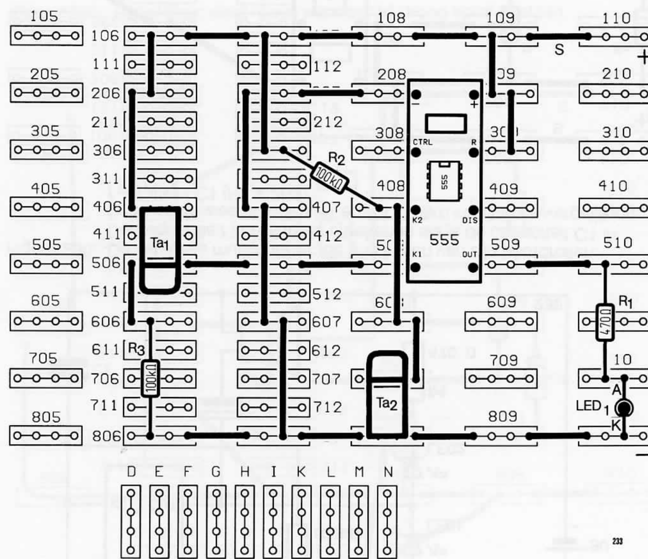
172 De schakeling zoals aangegeven in figuur 232 heb je in een mum van tijd opgebouwd. Als je de batterij inschakelt, licht meestal LED1 op. Als je op toets Ta1 drukt, dooft de diode; door een druk op toets Ta2 schakel je ze weer in. Dat is logisch, want als LED1 geen licht uitstraalt, wil dat zeggen: de uitgang heeft een negatieve polariteit. De reset-uitgang is dus in werking. Die wordt op zijn beurt gestuurd door K1 zodra de uitgang van deze comparator meer dan 2/3 van de batterijspanning krijgt. Daar zorgt Ta1 voor. Als we daarentegen op toets Ta2 drukken, verlagen we de spanning aan K2 en dan wordt de flip-flop geset. Dan krijgt de uitgang dus een hoge spanning en licht LED1 op.



Figuur 231. Het opbouwschema bij figuur 230.



Figuur 232. Voor elke drempel de juiste spanning: het flipt en flopt.



Figuur 233. Het opbouwschema bij figuur 232.

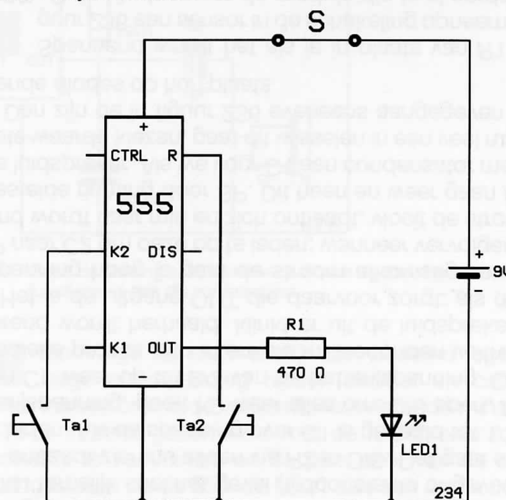
Voor een vakman op het gebied van de digitale techniek die deze schakeling onder ogen krijgt, ziet de zaak er als volgt uit: Ta1 - reset, schakelt met *high* (hoge spanning) de uitgang naar *low* (lage spanning). Ta2 - set "dwars" (met een dwarsstreepje, dat wil zeggen "inverterend") schakelt met low de uitgang naar *high*.

173

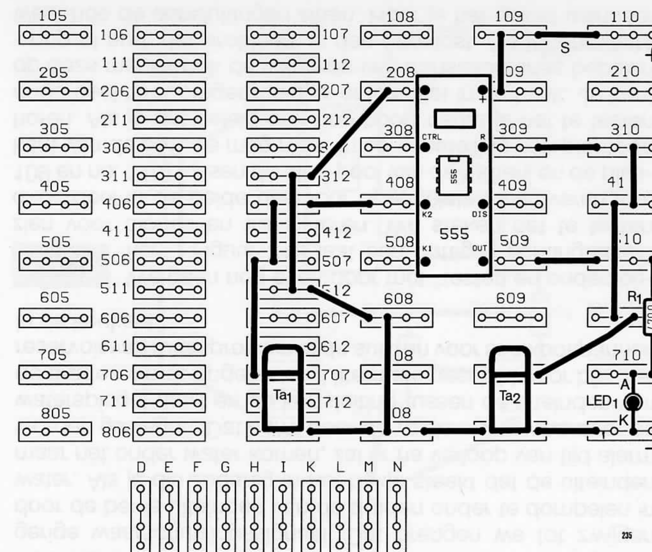
We laten de vorige proefschakeling nog even zoals hij is en drukken weer op toets Ta2, zodat LED1 oplicht. Deze keer laten we deze toets echter niet los. Als we nu bovendien op toets Ta1 drukken, dooft LED1 niet. Dat gebeurt pas wanneer we Ta2 loslaten. Als we er nu voor zorgen dat Ta1 gesloten blijft, heeft een druk op toets Ta2 slechts tot gevolg dat LED1 alleen blijft licht geven zolang we op deze toets blijven drukken! Daaruit kunnen we concluderen: de onderste comparator "overheerst" de bovenste, is dus sterker dan deze. Wanneer aansluiting 2 (K2) een constante negatieve polariteit heeft, heerst er aan de uitgang een hoge spanning (positief). Wanneer daarentegen aansluiting 6 (K1) een positieve spanning heeft, terwijl aan de uitgang negatieve spanning heerst, kan de hoge spanning aan de uitgang slechts in stand worden gehouden, zolang K2 verbonden blijft met de minpool. En dat lukt in ieder geval!

174

Overeenkomstig de aanwijzingen in figuur 234 laten we K1 open en sturen de comparator K2 (die verantwoordelijk is voor het setten) en de aansluiting R (die dus reset, en wel inverterend d.w.z. met een lage ingangsspanning) via Ta1 en Ta2. Dan zien we: LED1 gaat aan wanneer K2 een negatieve spanning krijgt (door op toets Ta1 te drukken), maar de diode dooft onmiddellijk zodra ook (of alleen) R negatieve spanning krijgt (door een druk op toets Ta2). In dit geval overheerst dus de aansluiting R. Het bewijs hiervan: druk op Ta1 (LED1 geeft licht) en houd de toets vast. Druk vervolgens ook op Ta2 en je zult zien dat LED1 geen licht meer geeft zolang je op Ta2 blijft drukken. Vervolgens drukken we op Ta2 (LED1 dooft) en houden de toets vast. Nu heeft Ta1 geen invloed meer. LED1 blijft donker.



Figuur 234. De andere flop: de reset-ingang domineert.



Figuur 235. Het opbouwschema bij figuur 234.

Dus ook wanneer R negatief is kan er aan de uitgang continu een negatieve spanning staan. En als we ook dit weer vanuit "digitaal standpunt" bekijken, ziet er als volgt uit: Ta1 - set "dwars", schakelt met low de uitgang naar high. Ta - reset "dwars", schakelt met low de uitgang naar low.

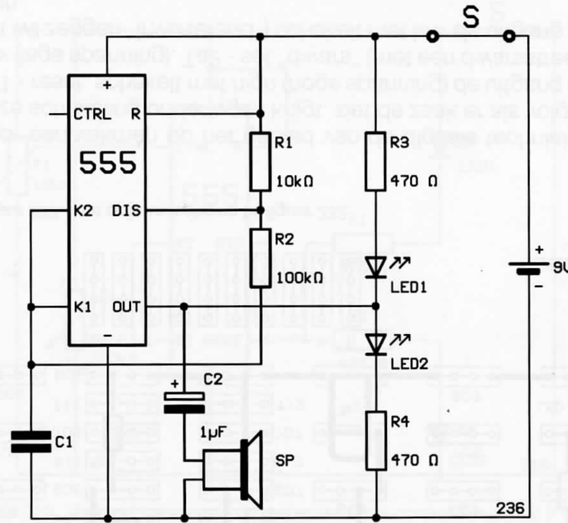
Overigens: al deze ingangen zijn zeer gevoelig. Verbaas je dus niet als er opeens een omschakeling plaatsvindt enkel en alleen omdat je een onderdeel hebt aangeraakt of een stukje draad maar aan één kant hebt bevestigd of losgemaakt!

Maat en geluid

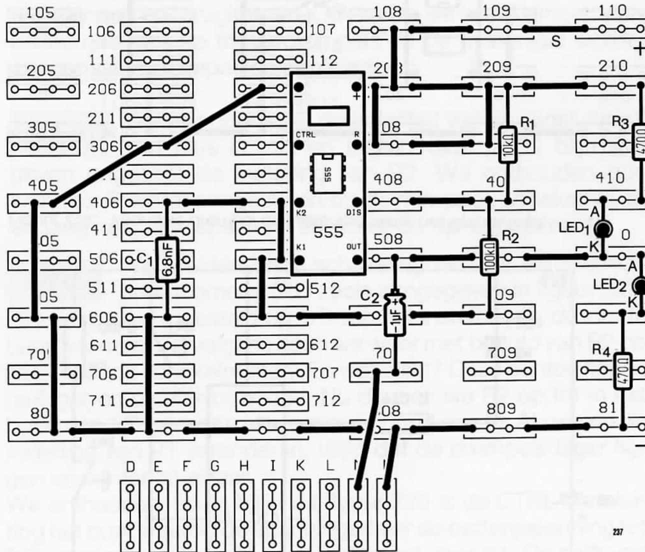
Astabiel? Dat is helemaal niet moeilijk - ook niet met de 555. In feite vormen astabiele schakelingen zelfs de hoofdmoot van de toepassingsmogelijkheden van de 555. Alleen of in combinatie met andere effecten.

175

Als je de schakeling opbouwt zoals aangegeven in figuur 236 krijg je de typische astabiele multivibrator met de 555. Hij is uitgerust voor beide mogelijkheden: lage frequenties voor het knipperlicht en hogere voor geluid. Op de plaats van *C*1 bevestigen we eerst een condensator met een waarde van 6,8 nF en we maken gebruik van de luidspreker. Daarna vervangen we *C*1 door een condensator van 10 µF en letten op de reactie van de licht-emitterende diodes. Die zullen om de beurt knipperen, al zijn de periodes waarin ze licht geven niet altijd even lang. Daar zullen we het nog over hebben. Eerst maar weer de gebruikelijke vraag: hoe doet hij dat? Wie tot dusver heeft meegedacht kan het antwoord daarop zelf direct wel geven.



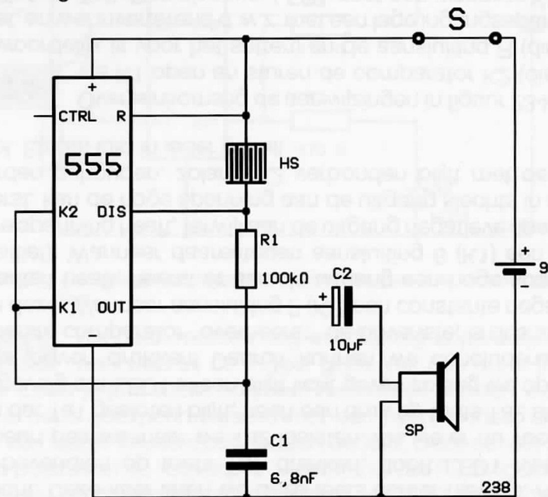
Figuur 236. De astabiele multivibrator: de 555 in een van zijn hoofdrollen. De frequentie *f* kun je in Hz uitrekenen als je de capaciteit *C*1 in farad en de weerstanden *R*1 en *R*2 in ohm invult in de vergelijking: $f = 1{,}433 / C1\,(R1 + 2R2)$.



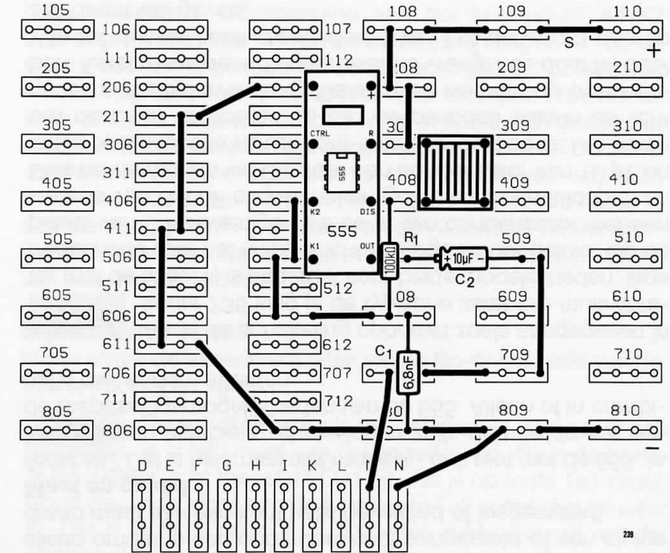
Figuur 237. Het opbouwschema bij figuur 236.

Als we figuur 225 aan een grondig onderzoek onderwerpen stellen we vast: deze keer doet ook de ontlaad-uitgang DIS mee. Hij gaat volledig in negatieve geleiding zodra de uitgang OUT dat eveneens doet. Dat gebeurt wanneer de spanning aan K1 is toegenomen tot iets meer dan 2/3 van de batterijspanning. Daarvoor zorgen *C*1 en (*R*1 + *R*2). Dat is bij 6,8 nF en 110 kΩ tamelijk snel het geval (tijdconstante ongeveer 7,5 ms). *C*1 ontlaadt zich nu alleen via *R*2 in DIS. Dat gaat sneller dan het laden. Als de spanning over *C*1 is gedaald tot 1/3 van de batterijspanning, gooit K2 weer alles om: DIS spert, *R*1 en *R*2 laden *C*1 weer op tot 2/3 van de batterijspanning. Omdat dit periodieke proces zich in enkele milliseconden voltrekt en voortdurend wordt herhaald, klinkt er uit de luidspreker een geluid. Het is de uitgang OUT die daarvoor zorgt: als de uitgangsspanning hoog is gaat de stroom afkomstig van OUT door SP naar *C*2 om deze op te laden; wanneer vervolgens *C*2 geleidend wordt naar min en zich ontlaadt, vloeit de stroom in tegengestelde richting door SP. Dit heen en weer gaan horen we in de luidspreker. Als we voor *C*1 een condensator met een zeer grote waarde kiezen, gaat dit wisselen in een veel rustiger tempo. Dan zijn de in figuur 236 eveneens aangegeven lichtemitterende diodes op hun plaats.

176 Spannend wordt het als je in plaats van *R*1 in figuur 236 een sensor in de schakeling opneemt (HS, figuur 238). Gebruik daarvoor de module die je al eerder van een laagje keukenzout hebt voorzien. Als de lucht droog is, zul je wellicht nog helemaal niets horen. Je hoeft echter maar even met een vochtige vinger in de buurt te komen van de HS om de luidspreker "aan de praat" te krijgen. En je kunt het effect nog versterken door op de sensor te ademen. Dan wordt de toon die in het begin nog tamelijk diep was, behoorlijk schril, totdat de sensor weer is opgedroogd. Hoe dat in z'n werk gaat? Wij verklappen niets, maar alles wordt nu vanzelf duidelijk - zie de toelichting hierboven!



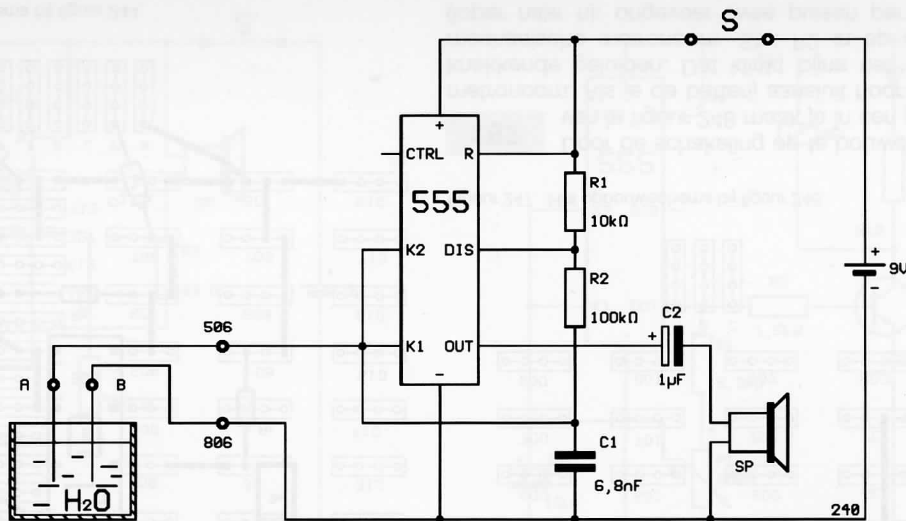
Figuur 238. Luchtvochtigheid is relatief: de toonhoogte verschaft opheldering: hoe vochtiger de lucht, des te hoger de toon.



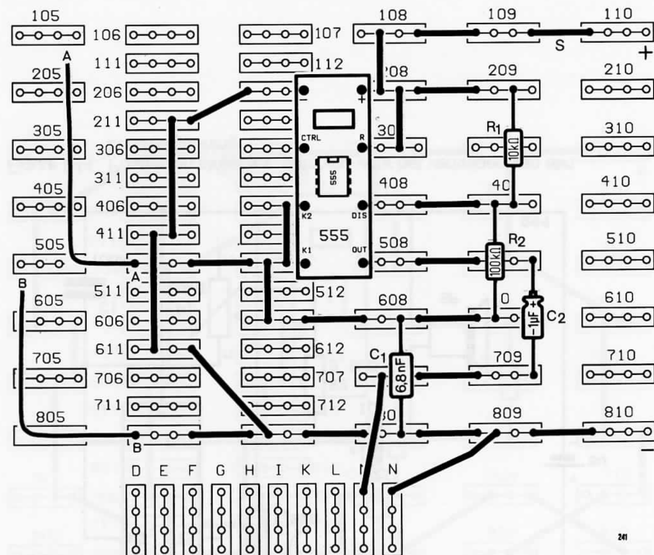
Figuur 239. Het opbouwschema bij figuur 238.

177 Voor "gewoon", dus geleidend water volstaan twee stukken draad met afgestripte uiteinden als sensor. We verbinden die met punt A (klemveer 506) en B (klemveer 806) van de schakeling aangegeven in figuur 240 en stellen de schakeling weer in werking. De plaats van de onrustige sensor uit de vorige proef is nu weer ingenomen door de stabiele weerstand van 10 kΩ. Dat resulteert in het al bekende opdringerige waarschuwingssignaal. Dat brengen we tot zwijgen door de beide uiteinden van de draden onder te dompelen in water. Als je die zodanig in het bakje steekt dat de uiteinden maar nèt onder water komen, zal er na verloop van tijd alarm worden geslagen. Dat komt door de verdamping waardoor de waterspiegel daalt en de kortsluiting tussen de uiteinden van de draden wordt opgeheven. Uitermate geschikt voor bijv. het reservoir van ruitesproeiers in de auto en voor snelkookpannen in de keuken!

178 We gaan nog even door met "testen en onderzoeken". Figuur 242 laat een nuttige "richtingtester" zien voor diodes en transistoren. We steken het te testen onderdeel in de beide daarvoor opengelaten klemveren (no. 109 en no. 110) tussen de plus-pool van de batterij en de pluskant van de 555. Je mag maar in één opstelling een pieptoon horen. Als je dat geluid ook nog hoort nadat je het te testen onderdeel hebt omgedraaid, is er iets niet in de haak. Je kunt op deze manier ook de volgorde van transistorzones bepalen - pnp of npn, dat probleem is dan opgelost. Als je tenminste weet hoe de aansluitingen zitten. Hoor je het geluid wanneer

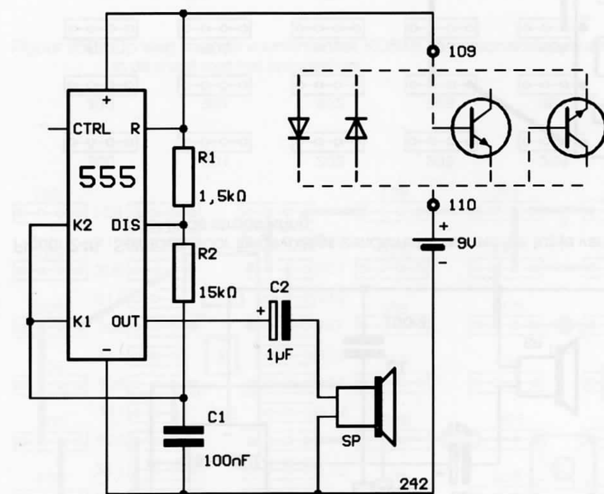


Figuur 240. Pottekijker: slaat alarm wanneer hij droog komt te staan.



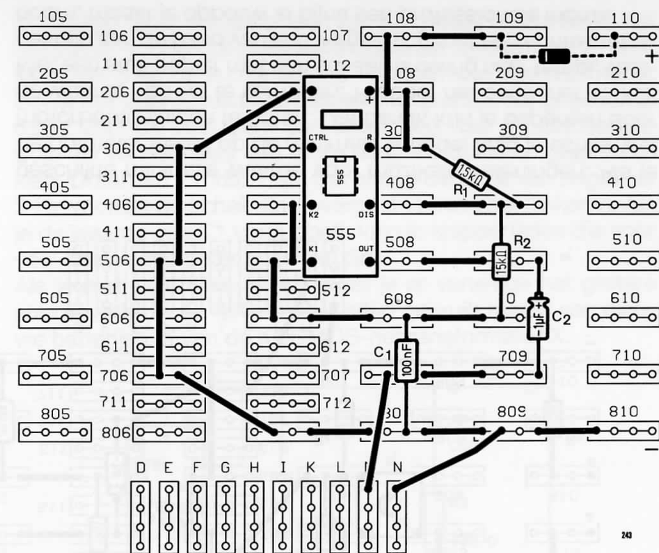
Figuur 241. Het opbouwschema bij figuur 240.

de basis aan de plus-pool van de batterij ligt, dan heb je te maken met een npn; als je het geluid hoort terwijl de emitter respectievelijk de collector op de plus-pool van de batterij is aangesloten, dan is het een pnp-transistor.



Figuur 242. Geeft de richting aan: tester voor diodes en transistoren, maar functioneert ook als controlepost.

179 Sommige transistoren zijn niet bestand tegen een hoge sperspanning tussen emitter en collector. Voor zulke transistoren is de volgende testmethode minder riskant: 470 Ω in serie geschakeld met de luidspreker (om de geluidssterkte te verkleinen) en de plus-pool van de batterij direct aangesloten op de 555. Je hoort dan een aanhoudende toon. Plaats het te testen onderdeel vervolgens tussen de plus-pool en de uitgang CTRL (5). De toonhoogte verandert

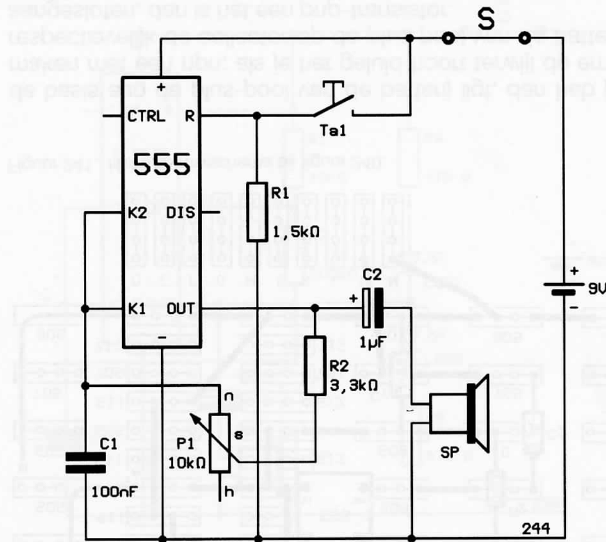


Figuur 243. Het opbouwschema bij figuur 242.

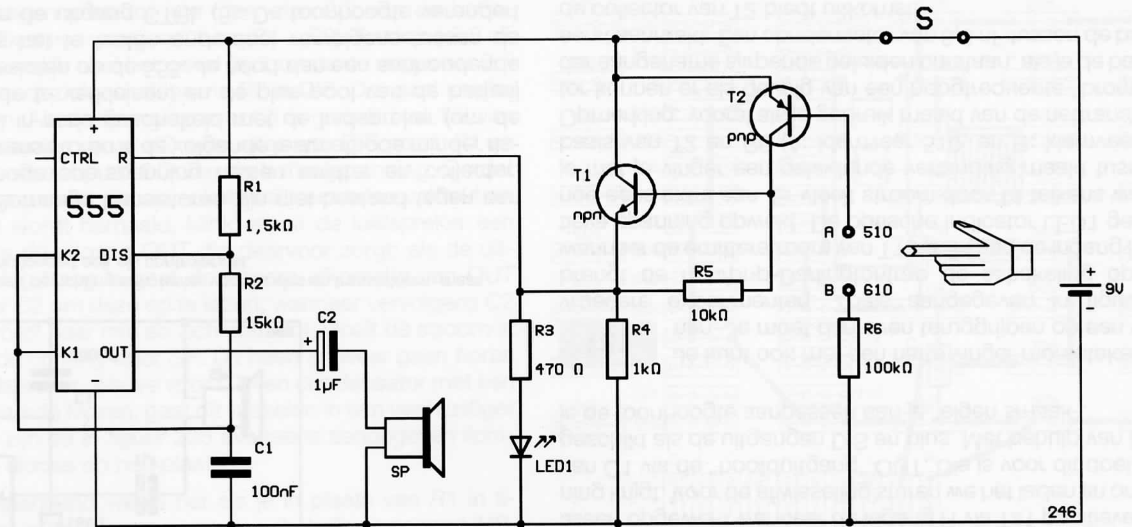
wanneer het pijltje van het transistorsymbool vanuit de plus-pool in de richting van CTRL wijst. Als het pijltje in de andere richting wijst, mag de grondtoon niet veranderen, anders is er met de transistor iets niet in orde.

180 Een andere soort test is die voor radioamateurs. De schakeling aangegeven in figuur 244 is prima geschikt voor het genereren van morsetekens. De toon wordt alleen opgewekt wanneer de ingang R via Ta1 positieve spanning krijgt. Voor de afwisseling sturen we het laden en ontladen van *C1* via de "hoofduitgang" OUT. Die is voor dit doel net zo geschikt als de uitgangen DIS en plus. Met behulp van P1 kun je de toonhoogte aanpassen aan je "eigen smaak".

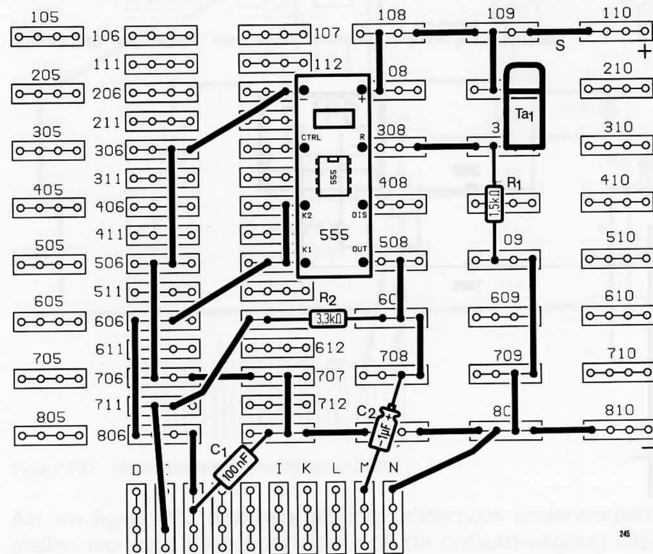
181 Je kunt ook met een natte vinger morsetekens seinen. Je moet dan even teruggrijpen op een van de vroegere experimenten. Zoals aangegeven in figuur 246 brengt de npn/pnp-Darlingtontrap de schakeling op gang wanneer de emitterstroom van T1 via *R4* aan de ingang R positieve spanning opwekt. De optische indicator LED1 geeft dat nog eens extra aan. Er vloeit stroom door T1 telkens wanneer je met je vinger een geleidende verbinding maakt tussen de basis van T2 en *R6* (A: klemveer 510, en B: klemveer 610). Opmerking: vooral als je gebruik maakt van de nettransformator kunnen er als gevolg van een hoogfrequente "brom" minder aangename sjirpende geluiden ontstaan, als je de basis het eerst aanraakt. Een condensator van 6,8 nF tussen de basis en de collector van T2 biedt uitkomst!



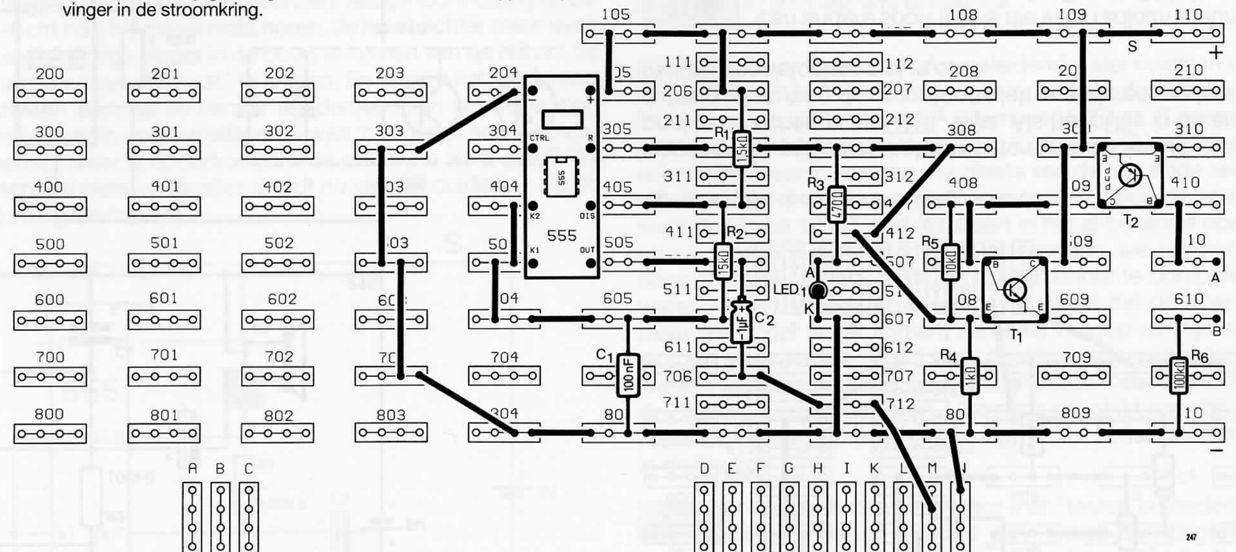
Figuur 244. Puntjes en streepjes: oefening voor het verkrijgen van een zendvergunning.



Figuur 246. Seintoets voor fijngevoelige zendamateurs: met het topje van je vinger in de stroomkring.

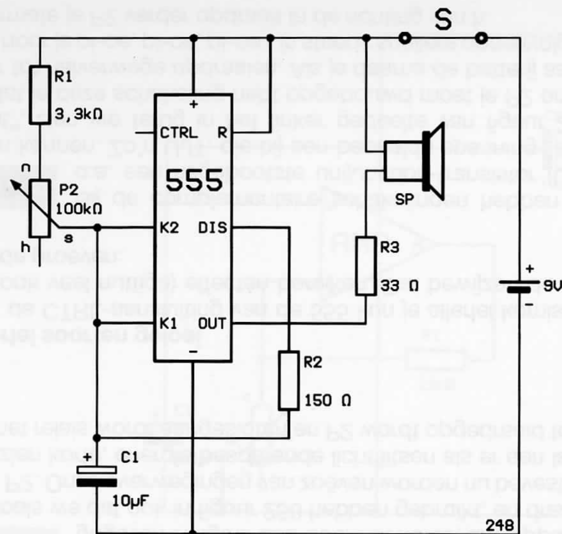


Figuur 245. Het opbouwschema bij figuur 244.

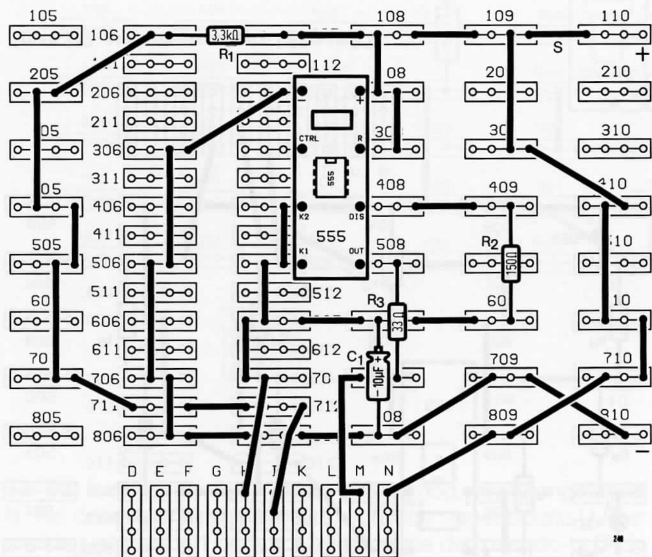


Figuur 247. Het opbouwschema bij figuur 246.

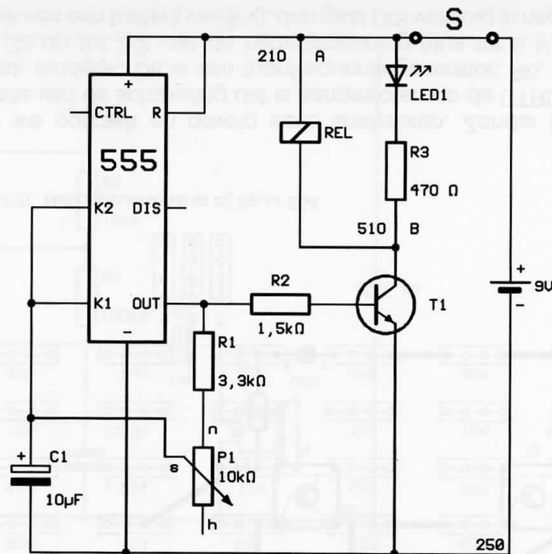
182 Door de schakeling op te bouwen zoals aangegeven in figuur 248 maak je in een paar minuten een metronoom. Als je de batterij aansluit hoor je korte, "droge" knakkende geluiden. Dat klinkt bijna net zo als de echte, mechanische metronoom. Stel P2 in op maximale sterkte (loper naar h): ongeveer twee pulsen per seconde is een geschikte minimale waarde voor muzikale oefeningen. Als je de potmeter instelt op de minimale waarde, krijg je echter wel motorbootgeluiden te horen. Dat bereik kun je beperken door de waarde van *R*1 te verhogen. Probeer het eens met 15 kΩ! Met een stuk papier met een schaalverdeling naar tempi, vastgesteld aan de hand van een vergelijking met een echte metronoom, maakt je opbouw al bijna een professionele indruk.



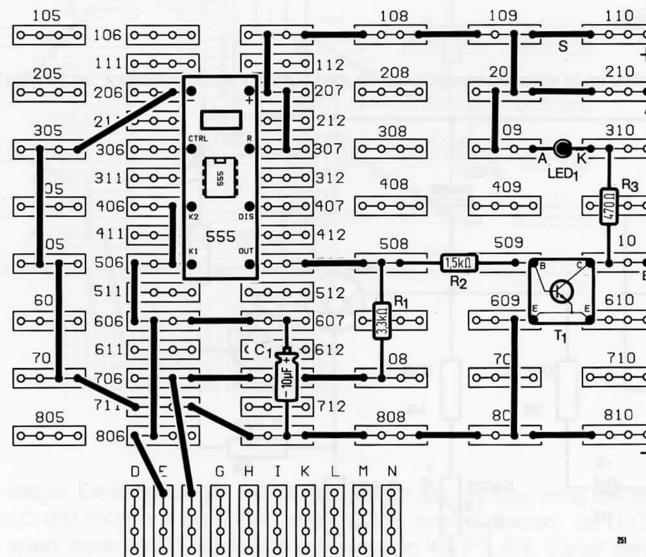
Figuur 248. Steuntje bij het maathouden: onontbeerlijk voor elke muziekleerling.



Figuur 249. Het opbouwschema bij figuur 248.

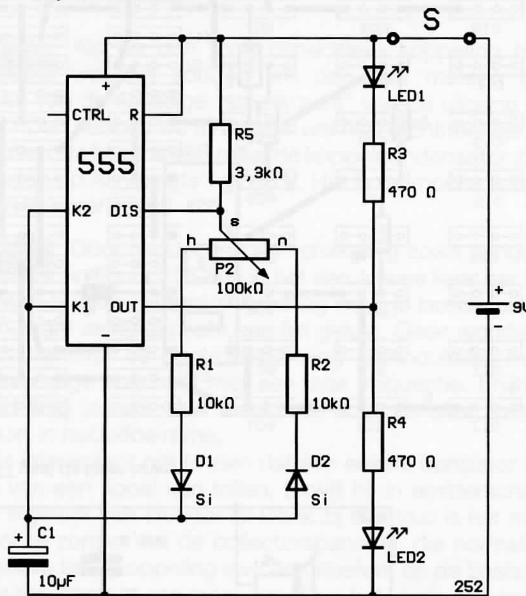


Figuur 250. Op weg naar de vuurtoren: het KOSMOS-netschakelapparaat X in de maat met het knipperlicht.



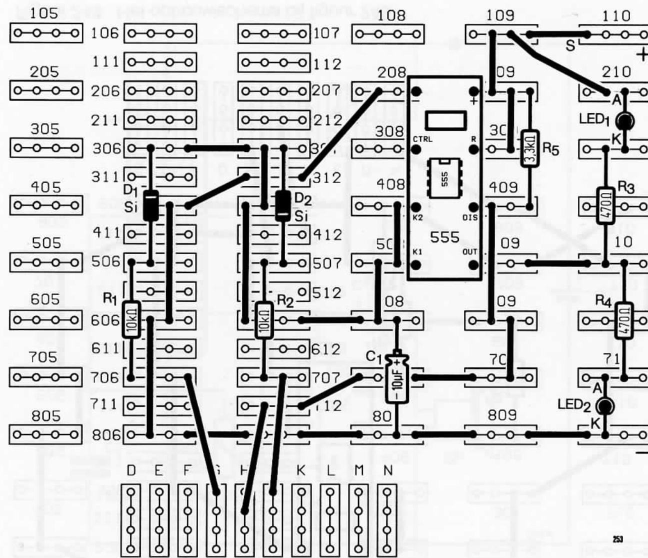
Figuur 251. Het opbouwschema bij figuur 250.

183 Door het aansluiten van een relais, bijvoorbeeld het KOSMOS-netschakelapparaat X (klemveer 210: A; klemveer 510: B), kun je de 555 voorzien van een krachtarm. Bouw het waarschuwingsknipperlicht op zoals aangegeven in figuur 250. De LED dient dan alleen nog voor de functiecontrole als via het relais een grote lamp wordt in- en uitgeschakeld. Draai aan P1: dan blijkt dat er een bereik is van ongeveer 3 Hz voordat de schakeling overgaat in een snel flikkeren. Als je de waarde van *C*1 verdubbelt, krijg je knippertijden die voor veel doeleinden beter geschikt zijn.
Als je met een relais werkt, moet je er vanwege het grotere stroomverbruik op letten dat je altijd gebruik maakt van nieuwe batterijen of van de KOSMOS-nettransformator X.



Figuur 252. De truc met de pulsduur: frequentie constant, tijden vrij naar keuze.

184 Binnen ruime grenzen kun je de tijdsverhouding tussen lage en hoge spanning aan de uitgang OUT variëren door middel van de schakeling zoals aangegeven in figuur 252. Bouw de schakeling op en draai vervolgens aan P2. Duidelijke zaak: *C*1 wordt geladen via *R*5, het h-s gedeelte van P2, *R*1 en D1; ontlading vindt plaats via D2, *R*2 en het n-s gedeelte van P2. In welke positie de loper van P2 ook staat, voor de totale trilling is de som van de weerstanden (afgezien van *R*5) constant. Dat betekent echter: de frequentie verandert (nagenoeg) niet, maar je kunt wel kiezen of je de bovenste of de onderste LED langer licht wilt laten geven - dat komt goed van pas bij knipperlichten met maar één lamp en bespaart energie! Wij hebben in het KOSMOS-laboratorium deze schakeling met *C*1 = 0,1 µF (dat is gemakkelijker bij het meten)



Figuur 253. Het opbouwschema bij figuur 252.

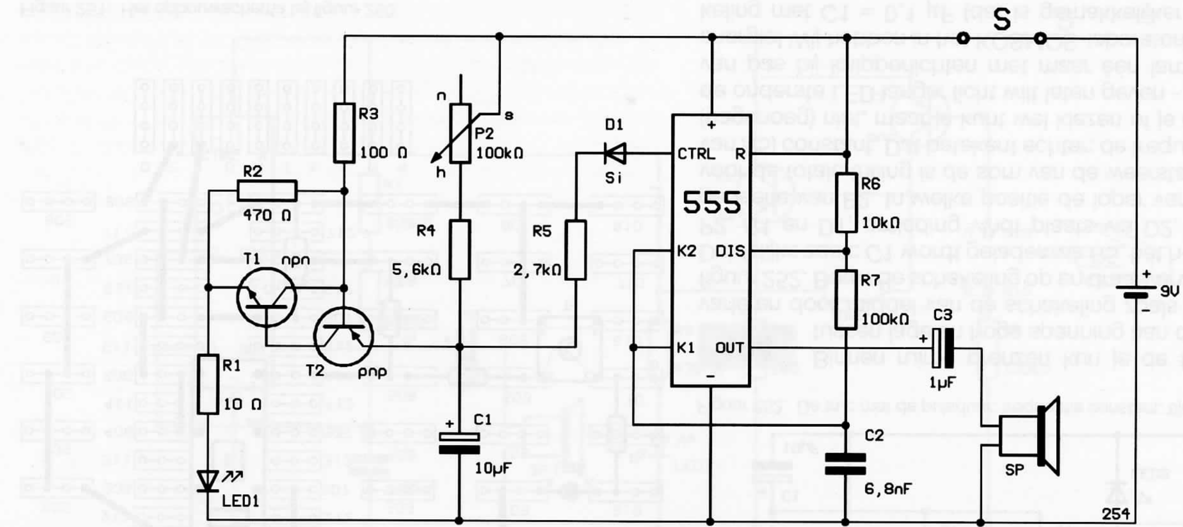
nader onderzocht. En inderdaad - de frequentie verandert nauwelijks, maar de puls-pauzeverhouding (dus de verhouding tussen de tijd(en) met hoge spanning aan OUT en de tijd(en) met lage spanning) konden we variëren van 100:7 tot 7:100!

185 We vervangen nu *R*4 en LED2 in de schakeling aangegeven in figuur 252 door het netschakelapparaat X, zoals we dat ook in figuur 250 hebben gebruikt, en draaien aan P2. Onze overwegingen van zoëven worden nu bevestigd: we zien korte, energie besparende lichtflitsen als er een lamp op het relais wordt aangesloten en P2 wordt opgedraaid tot h.

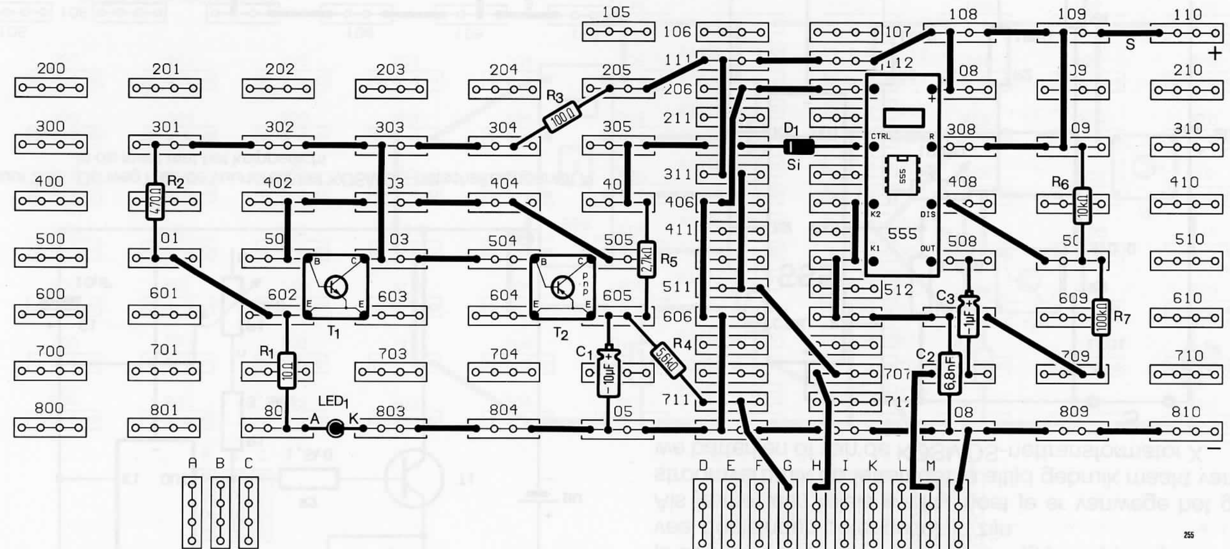
Allerlei soorten geloei

Met de CTRL-aansluiting van de 555 kun je allerlei komische (en ook veel nuttige) effecten bereiken. Dat bewijzen de volgende proeven.

186 Bij de complementaire schakelingen hebben we o.a. een nagebootste unijunction-transistor (UJT) leren kennen. Zo'n UJT, die bij een bepaalde spanning "aanslaat", zien we terug in het linker gedeelte van figuur 254. Nadat je deze schakeling hebt opgebouwd moet je P2 ongeveer tot halverwege opdraaien. Als je daarna de batterij aansluit, hoor je pi-oe, pi-oe, pi-oe - in steeds snellere opeenvolging naarmate je P2 verder opdraait in de richting van h.

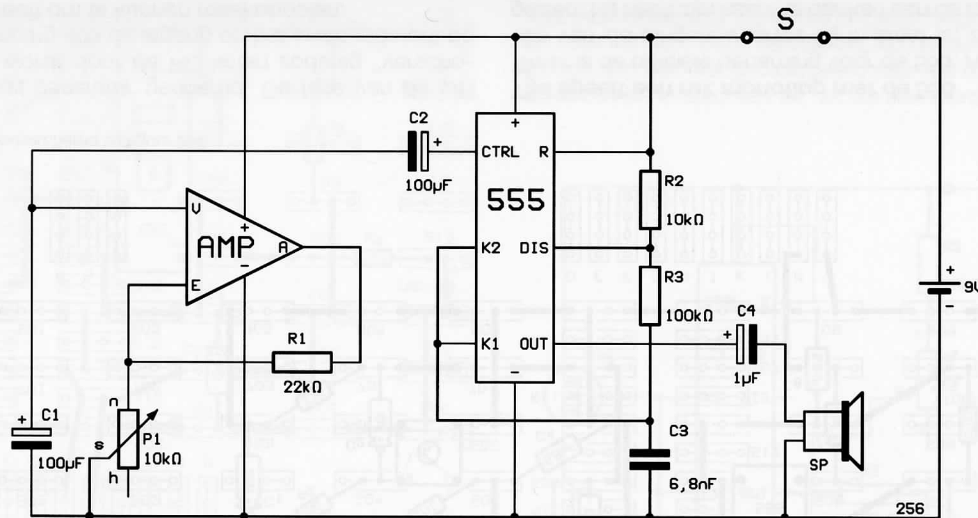


Figuur 254. Zaagtand op de instelling voor de drempelwaarde: dank zij de nagebootste UJT gaat de timer janken.

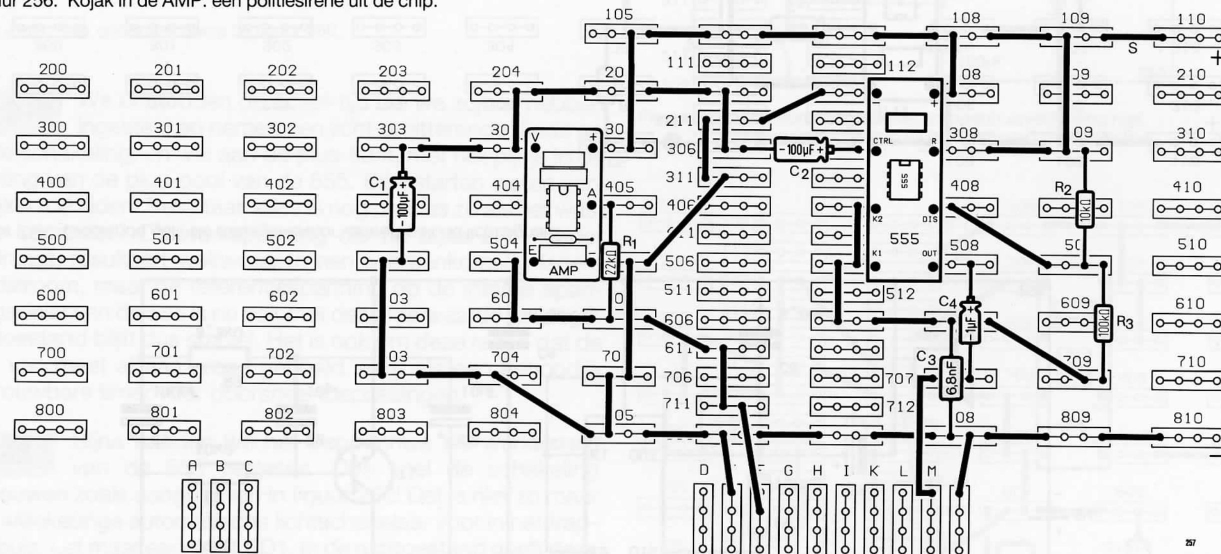


Figuur 255. Het opbouwschema bij figuur 254.

Laten we oorzaak en gevolg eens analyseren. Zonder het gedeelte van de schakeling dat is aangesloten op de CTRL is de zaak duidelijk. Dit is een toonfrequentiegenerator: *R*6, *R*7 laadt *C*2 op tot 2/3 van de batterijspanning (dus tot 6 V bij gebruik van een batterij van 9 V), dan gaat DIS volledig in negatieve geleiding en *C*2 ontlaadt zich via *R*7. Maar nu gaat CTRL een rol spelen. Vanwege D1, *R*5 kan de spanning op deze aansluiting nooit hoger worden dan die over *C*1 plus de diodespanning van D1. *C*1 op zijn beurt laadt zich op tot de maximale waarde die wordt bepaald door de ingestelde spanning van *R*3, *R*2, *R*1, LED1 en door de basis-emitterspanning van



Figuur 256. Kojak in de AMP: een politiesirene uit de chip.



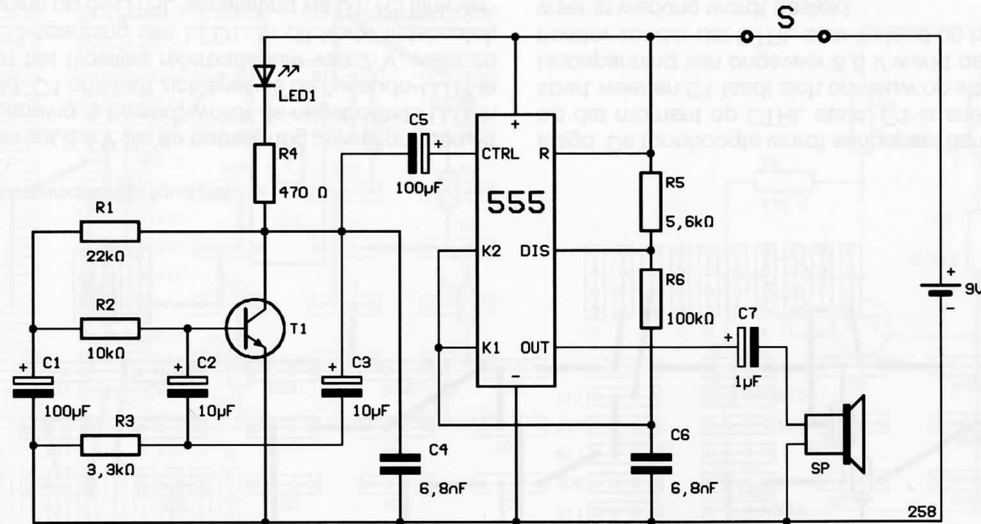
Figuur 257. Het opbouwschema bij figuur 256.

T2. Dat is ongeveer 8,4 V als de batterij nog vrijwel ongebruikt is. Als deze spanning is bereikt, wordt de nagebootste UJT in werking gesteld. *C*1 ontlaadt zich snel via de "pseudo-UJT" in de richting van het tijdelijke referentiepunt van 2 V, want zo hoog is de LED-spanning van LED1. In dit korte tijdsbestek wordt de spanning op de CTRL-aansluiting via D1, *R*5 flink verlaagd. De toonhoogte wordt aangepast aan de spanning die er op dat moment op CTRL staat. *C*1 is snel ontladen, de UJT spert weer en *C*1 laadt zich opnieuw op via P2, *R*4. Vanaf een laadspanning van ongeveer 6,6 V werkt de toonfrequentiegenerator zonder dat CTRL daar invloed op heeft, totdat de UJT weer in werking wordt gesteld.

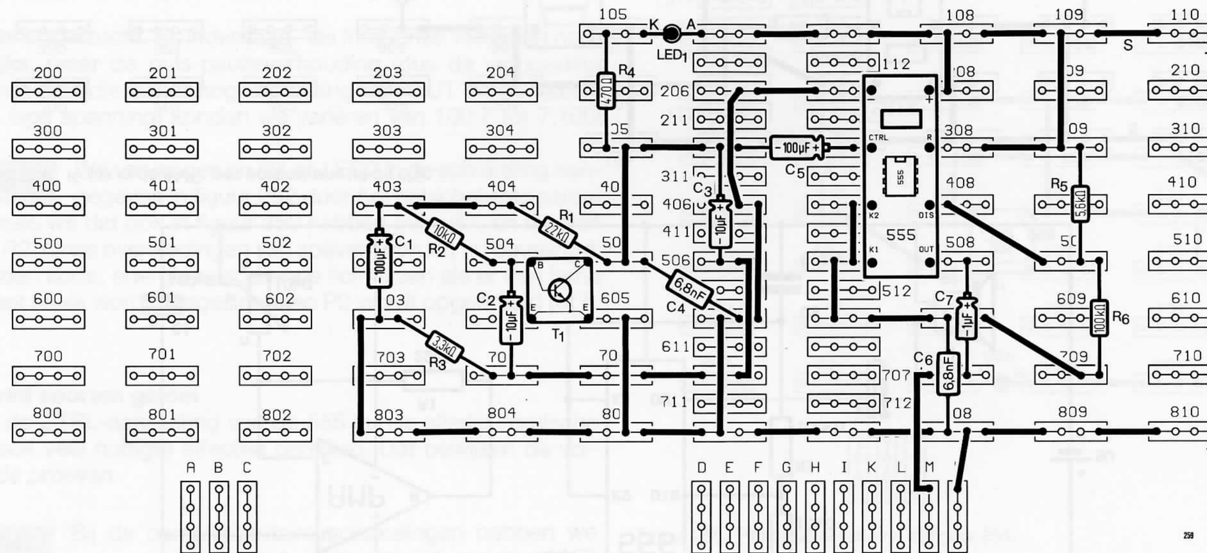
187 Zo'n condensator-laadkromme als het zojuist toegepaste spanningsverloop komt ook tot stand aan de V-ingang van de AMP wanneer die als generator functioneert. Dat gaan we testen nadat we de schakeling hebben opgebouwd zoals aangegeven in figuur 257. Zodra de batterij is aangesloten begint Kojak aan zijn klus in Manhattan. Met behulp van P1 kunnen we deze politiesirene aanpassen aan de sound die je van de tv kent. Het bijzondere karakter is een gevolg van de capacitieve koppeling tussen CTRL en V. Op die manier wordt de controlespanning *gemoduleerd* met een "glooiende", nagenoeg symmetrische zaagtand-curve met een amplitude van ongeveer 0,5 V, dus ongeveer 0,25 V naar boven en naar beneden.

188 Als we dan toch capacitieve koppeling hebben, waarom zouden we dan niet meteen gebruik maken van de volledige "stootkracht" van de uitgang van de AMP? Dan hebben we overigens wel met rechthoekige pulsen te maken. Je hoeft alleen maar de koppelcondensator (*C*2) aan te sluiten op A in plaats van op V. Het is de moeite waard wat je dan te horen krijgt!

189 Door middel van de schakeling zoals aangegeven in figuur 258 kun je het een à twee keer per seconde laten "janken". Deze schakeling mag je beslist niet overslaan, want ze maakt echt een fijn geluid. Geen wonder - hier wordt namelijk de controlespanning gemoduleerd met een sinusvormige spanning met een lage frequentie. En behalve geluid krijg je ook weer beeld: de lichtintensiteit van LED1 varieert in hetzelfde ritme.
Het is interessant om te zien dat één enkele transistor zonder hulp van een spoel kan trillen, terwijl hij in emitterschakeling toch eigenlijk een invertor is! Dank zij een truc is het mogelijk ervoor te zorgen dat de collectorspanning, die normaliter als negatieve terugkoppeling invloed uitoefent op de basis, plotsklaps resulteert in een meekoppeling. Laten we ons nog eens even de basisproeven in het geheugen roepen.
Hoe zat dat ook al weer? Voor de condensator geldt: "In het begin was er de stroom." Hij laadt zich slechts geleidelijk op via de weerstand (waarover wel een spanning moet staan). Als door de spanning van deze condensator ook weer via een weerstand een tweede condensator wordt opgeladen en vervolgens een derde, wordt uiteindelijk alles omgekeerd. Weliswaar is de spanning over de laatste condensator aanzienlijk lager dan aan de ingang (vóór de eerste weerstand). Maar - wat een verrassing! - deze spanning is precies omgekeerd, vergeleken met de spanning "aan de voorkant". Dat is het geheim. Wanneer op een gegeven moment de spanning op de collector stijgt, zal ze aan het eind van de "*RC*-keten" juist dalen. Voor de basis is dat een *meekoppeling*. Dat geldt slechts voor één frequentie en die wordt bepaald door de tijdconstanten van de schakels in de keten. Zo'n schakeling wordt overigens



Figuur 258. Glooiende golf: de sinusgenerator varieert ook de lichtsignalen.



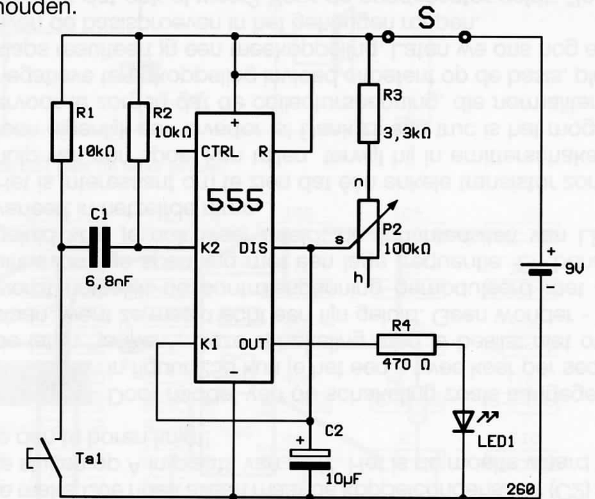
Figuur 259. Het opbouwschema bij figuur 258.

fase-verschuivings-generator genoemd. De fase van de uitgangsspanning wordt door de RC-keten zodanig "verschoven" dat de spanning aan de ingang op het juiste moment de juiste polariteit heeft om te kunnen meekoppelen.

Tijd speelt een rol: monoflop met de 555

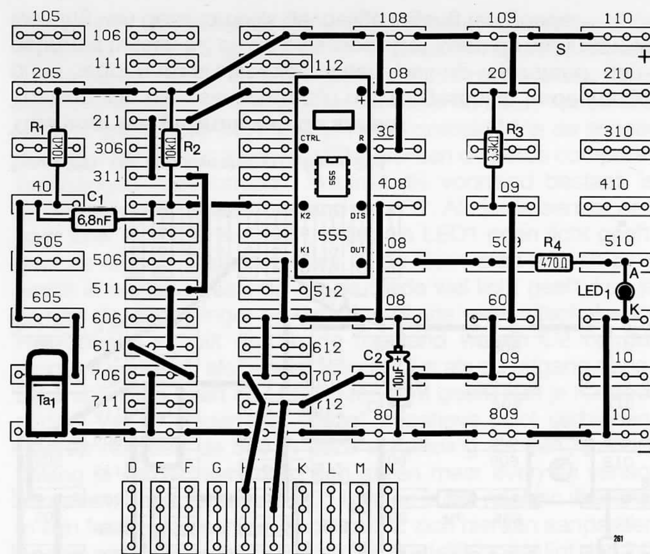
Timer is de officiële benaming voor de 555. Al is "timen" maar één van de dingen waartoe hij in staat is, zoals we hebben gezien. Hij heeft zijn naam te danken aan de monoflop-functie.

190 Nadat we de schakeling hebben opgebouwd zoals aangegeven in figuur 260, gaan we een (korte) reis in de tijd maken. Door een druk op toets Ta1 wordt het proces in werking gesteld. LED1 gaat aan. Na een seconde dooft ze al weer. We verhogen daarom de waarde van *C*2 tot 100 µF en meten hoelang de diode nu licht blijft geven. Dat blijkt tien keer zo lang te zijn. Vervolgens drukken we opnieuw op Ta1 en terwijl de diode al licht geeft nog een paar keer. De tijdopname leert dat dit niets heeft geholpen. De tijdsduur bedraagt nog steeds tien seconden. Deze schakeling kun je dus niet in de tussentijd opnieuw activeren of, zoals de technicus dat uitdrukt, *retriggeren*. Alleen de eerste start heeft effect. Dat starten gebeurt, zoals we hebben geleerd, op *dynamische* wijze. Je zou Ta1 dus net zo goed de hele actief-tijd gesloten kunnen houden.



Figuur 260. Prima voor eieren en toast: standvastige timer zonder de mogelijkheid tot retriggeren.

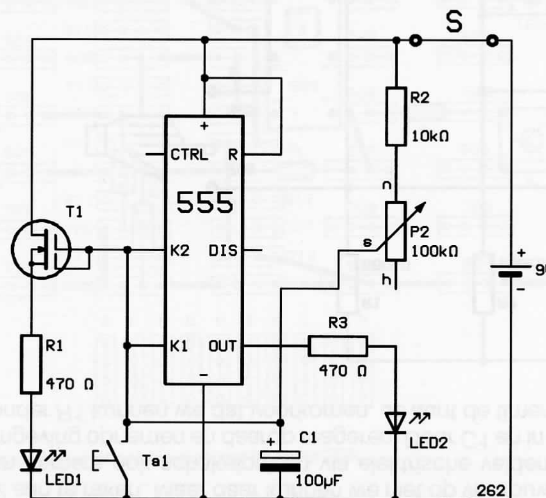
De timer-functie kun je heel goed berekenen, aangezien de condensator simpelweg wordt opgeladen van nul tot 2/3 van de batterijspanning. Comparator 1 reageert daarop en maakt DIS volledig negatief geleidend. Daardoor wordt de condensator ontladen en gereed gemaakt om van voren af aan te beginnen. De berekening levert voor de actief-tijd van de uitgang (dus hoge spanning aan OUT en LED1 geeft licht) het volgende resultaat op: $T = 1{,}1 \times (R3 + P2) \times C2$. Je verkrijgt de waarde van T uitgedrukt in seconden, als je de waarde van *R3* en P2 uitgedrukt in ohm en de waarde van *C*2 in farad invult in de formule. Zonder de ingangsstromen van de 555 (al zijn die nog zo klein) en de lekstroom van de elco's zou je eindeloos lange tijden kunnen bereiken. Maar de tijdschakeling houdt het op praktische waarden voor *C* tussen 100 pF en enkele honderden µF en voor de totale weerstand tussen 1 kΩ en een paar MΩ. Voor een eierwekker e.d. is dat in ieder geval lang genoeg.



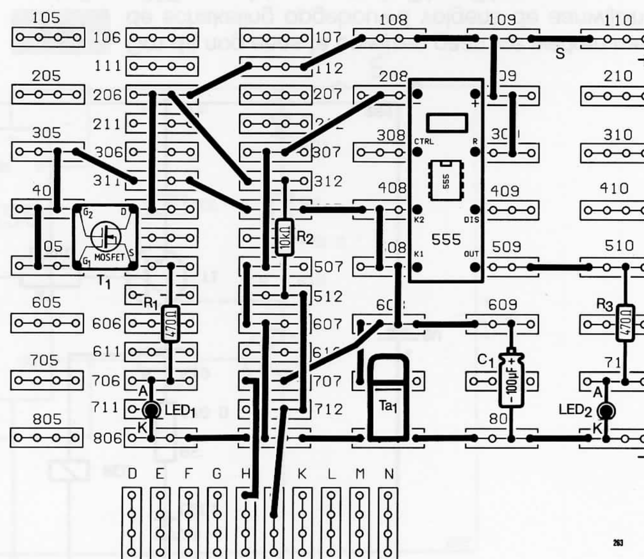
Figuur 261. Het opbouwschema bij figuur 260.

191 We onthouden de actief-tijd die we zojuist hebben ingesteld en nemen een licht-emitterende diode op in de schakeling, en wel aan de plus-kant, met het pijltje in de richting van de plus-pool van de 555. Dan starten we en vergelijken de tijden. Resultaat: alles is nog precies zo als het was. Hoe komt dat? De werkspanning die nu bijna 2 V minder bedraagt, resulteert weliswaar in een overeenkomstig lagere laadstroom, maar de referentiespanning op de interne spanningsdeler van de 555 is nu ook met dezelfde waarde verlaagd. De toestand blijft dus stabiel. Het is ook om deze reden dat de 555 van meet af aan graag gebruikt werd als een behoorlijk betrouwbare timer voor doorsnee-toepassingen.

192 Bijna hadden we het trappenhuis als werkterrein van de 555 vergeten. Dus snel de schakeling opbouwen zoals aangegeven in figuur 262! Dat is niet zo maar een willekeurige automatische lichtschakelaar voor in het trappenhuis. Let maar eens op LED1. In de rusttoestand geeft deze diode licht. Daardoor kun je zien waar de schakelaar zit wanneer het donker is. Druk vervolgens op Ta1: de "traplamp" (LED2) gaat aan en LED1 dooft. Maar niet voor lang. Wanneer ongeveer 1/3 van de actief-tijd van de timer voorbij is, gaat ze weer aan en waarschuwt: let op - dadelijk gaat de lamp weer uit! Dat is immers het verraderlijke van een eenvoudige trappenhuisverlichting - je weet nooit wanneer je plotsklaps weer in het donker komt te staan. Bij deze schakeling wordt je van te voren gewaarschuwd. Druk dus maar gauw op de toets en - wat een verrassing: de verlichtingstijd begint weer helemaal van voren af aan! Deze schakeling kun je dus wel *retriggeren*. Je hoeft dan ook niet gebiologeerd naar het rode lampje te blijven staren en te wachten tot het donker wordt.



Figuur 262. Voorkomt ongelukken: trappenhuisverlichting met waarschuwingssignaal en "opfrisser" (herhaaltoets).

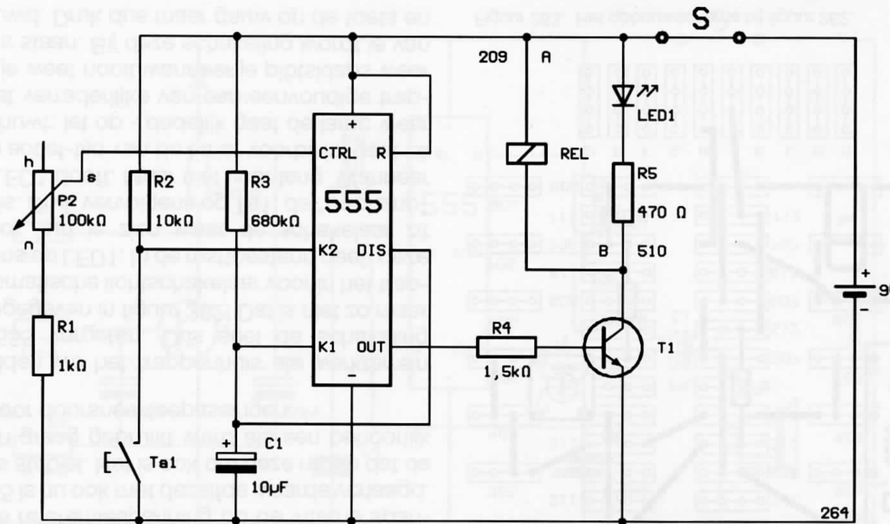


Figuur 263. Het opbouwschema bij figuur 262.

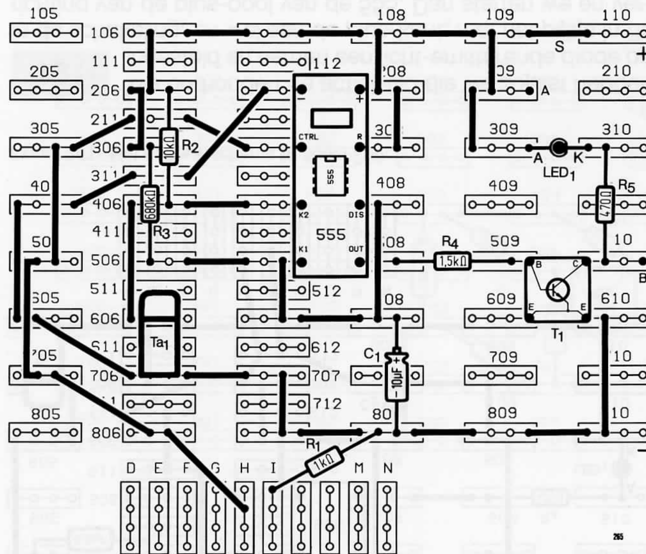
Voor deze test is 100 μF voor *C*1 een geschikte waarde. Voor de praktische toepassing is een laadweerstand van 1,5 MΩ aan te bevelen. Dat resulteert in de gebruikelijke verlichtingstijd van 3 minuten.

193 De timer opgebouwd volgens de aanwijzingen in figuur 264 wordt tijdens zijn actief-tijd op andere wijze gestuurd. Druk, nadat je de batterij hebt aangesloten, even op Ta1. LED1 geeft aan dat OUT onder hoge spanning staat, en zo hoort het ook als K2 op de min-kant wordt aangesloten. Bovendien is het als extra onderdeel opgenomen netschakelapparaat X (klemveren 209 en 510) in werking. Deze timer kan dus grote lampen in- en uitschakelen. Na ca. 8 seconden (1,1 x *R*3 x *C*1) kipt de schakeling terug in de rusttoestand, als P2 tenminste helemaal is opgedraaid (s op h). Als je nu deze loper tot ongeveer halverwege terugdraait en opnieuw Ta1 indrukt, zul je zien dat de actief-tijd nu duidelijk korter is. In totaal kun je binnen een bereik van ca. 1,5 tot 8 seconden instellen. Deze timer kun je niet retriggeren.
We stellen vast: door de controlespanning te veranderen (P2 vormt samen met de interne bovenste weerstand van 5 kΩ een spanningsdeler) schuift de schakeldrempel op in de richting van kortere tijden. Om ervoor te zorgen dat de schakeling ook bij de aanslag nog functioneert, raden we je aan de weerstand *R*1 met een waarde van ongeveer 1 kΩ in serie te schakelen met P2.





Figuur 264. De control-tower neemt het over: tijdbesturing via de aansluiting CTRL.

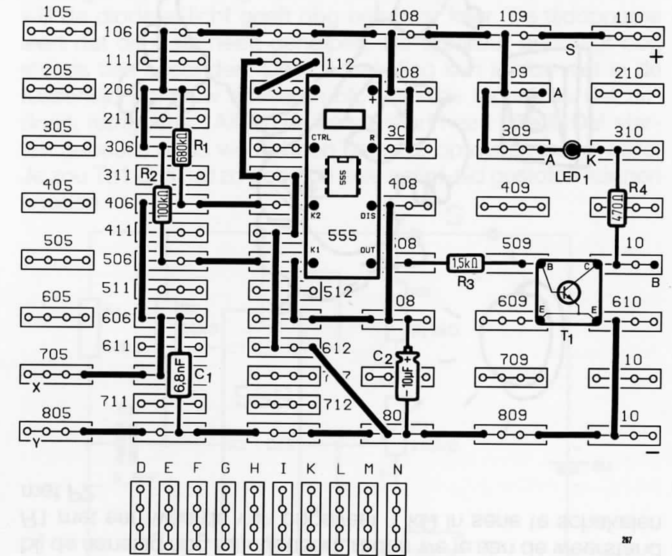


Figuur 265. Het opbouwschema bij figuur 264.

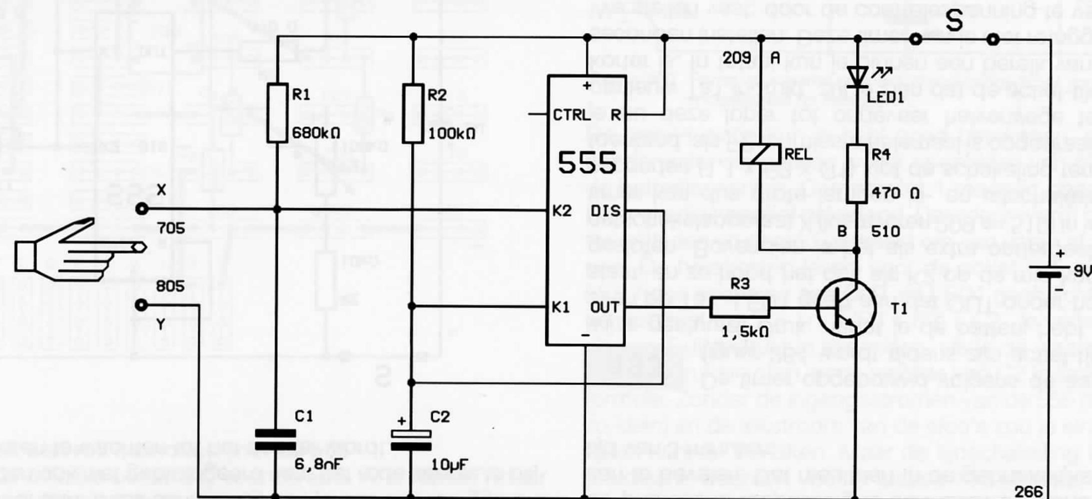
Tips voor het gebruik van de sensor

Toetsen zijn uit - sensoren zijn net zo geschikt! In de vorige proef hadden we al stilzwijgend een "pull-up-weerstand" aangebracht tussen K2 en de plus-pool. Dat komt de storingsvrije werking van deze tamelijk gevoelige ingang ten goede.

194 Om dit nog eens te bewijzen gaan we werken met de schakeling opgebouwd volgens de aanwijzingen in figuur 267, maar laten voorlopig *R*1 en *C*1 nog even weg. Dan blijkt: vooral wanneer we gebruik maken van de nettransformator X (capacitieve koppeling met het lichtnet!) kunnen we de timer al activeren door slechts één pool van de aansluiting K2 aan te raken. Maar daar kunnen we niet op vertrouwen. K2 kan immers ook schakelpulsen via elektrische velden uit de omgeving opnemen en daarop reageren. Door *C*1 en in het bijzonder *R*1 kunnen we dat voorkomen. Je kunt de timer echter gericht inschakelen door het topje van je vinger een beetje te bevochtigen en daarmee vervolgens een verbinding tot stand te brengen tussen de klemveren 705 en 805. Probeer het maar! Als het lukt bedraagt de huidweerstand van je vingertop beslist minder dan ongeveer 200 kΩ. En met deze gevoelige schakelaar kun je dan via het relais grote lampen in- en uitschakelen!

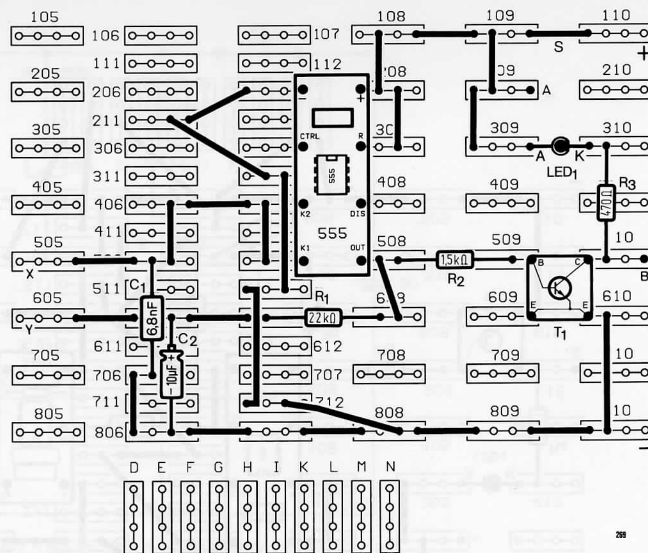


Figuur 267. Het opbouwschema bij figuur 266.

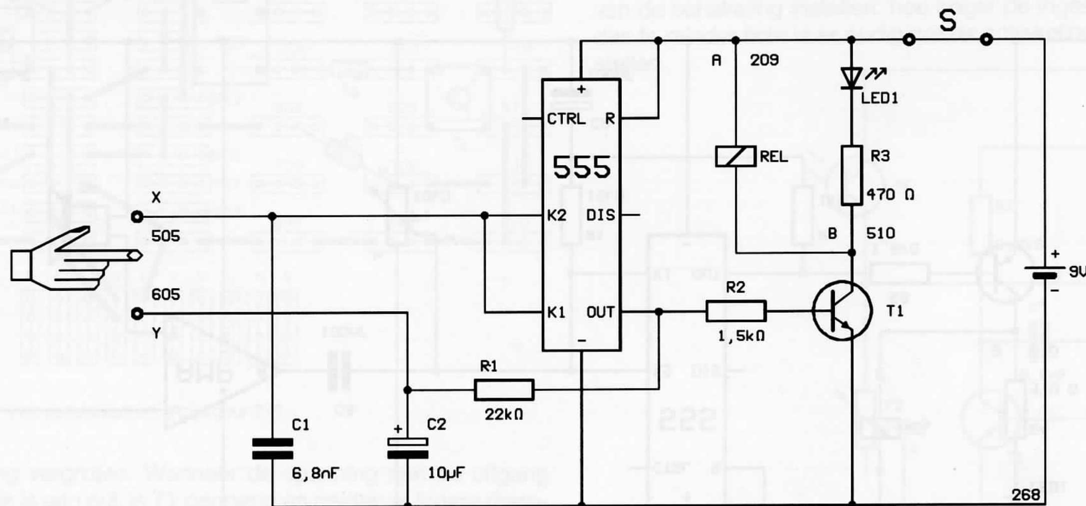


Figuur 266. Het starten van de timer via de huid: sensortoets in plaats van een metalen contact.

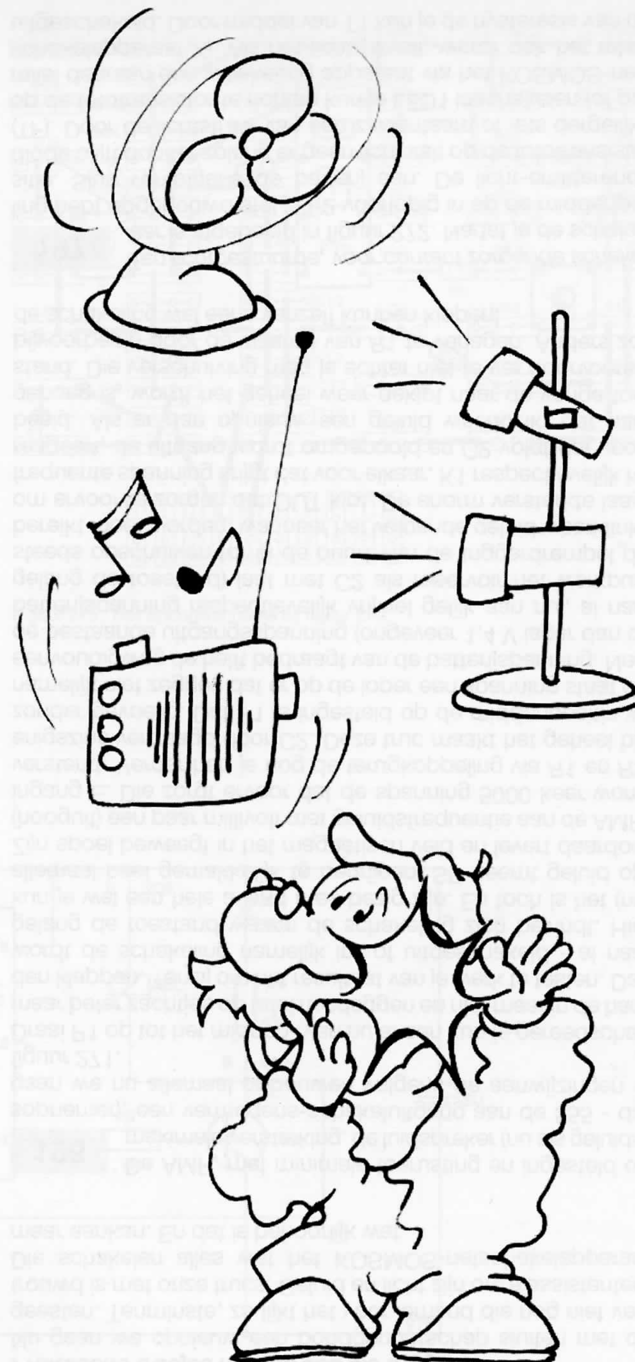
195 De schakeling die je nu kunt opbouwen volgens de aanwijzingen in figuur 268 maakt eigenlijk al geen deel meer uit van de timerschakelingen. De condensator *C2* is misleidend. Hij heeft namelijk een andere functie. Probeer die eens te achterhalen! En, heb je het al ontdekt? Via de sensor (X: klemveer 505; Y: klemveer 605) worden de beide comparatoringangen "bevoorraad". Waaruit die voorraad bestaat, is afhankelijk van de laadtoestand van *C2*. Als je de sensor een paar keer eventjes aanraakt, blijkt: als LED1 geen licht geeft, gaat ze nu aan. (Ook het relais, in de klemveren 209 en 510, wordt in werking gesteld.) Als de diode wel licht geeft, kun je ze met dezelfde vinger op dezelfde plaats weer uitschakelen. Het geheim schuilt dus in de toestand waarin *C2* op dat moment verkeert: als hij juist leeg is (dus als de uitgang negatieve spanning heeft en LED1 geen licht geeft) kun je K2 door middel van je vinger met "deze" negatieve pool verbinden. Daarop reageert de 555 in deze schakeling als een flip-flop: zolang je verder niets doet dan alleen maar even de sensor aanraken, geeft vanaf nu LED1 licht en is het relais in werking. In een fractie van een seconde zal *C2* zich hieraan aanpassen en zich opladen totdat zijn spanning duidelijk hoger ligt dan 2/3 van de batterijspanning. Door nu (weer slechts eventjes!) de sensor aan te raken zul je de ingang K1 bevoorraden: wanneer op deze aansluiting een hoge spanning staat, wordt de uitgang negatief geleidend, LED1 dooft en het relais wordt uitgeschakeld. Een flip-flop met wisseltoets. Of een trigger met zelfgemaakte drempelwaarden?
Overigens: als je je vinger op de sensor laat rusten, stel je een knipperlicht in werking! En bovendien hoef je je vingertop deze keer helemaal niet vochtig te maken.

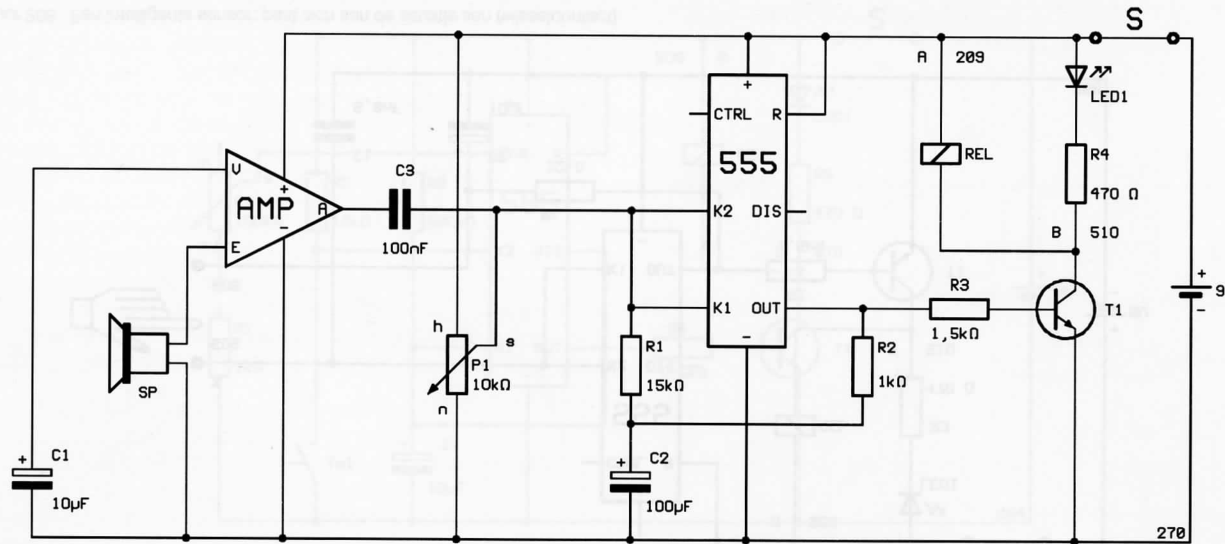


Figuur 269. Het opbouwschema bij figuur 268.

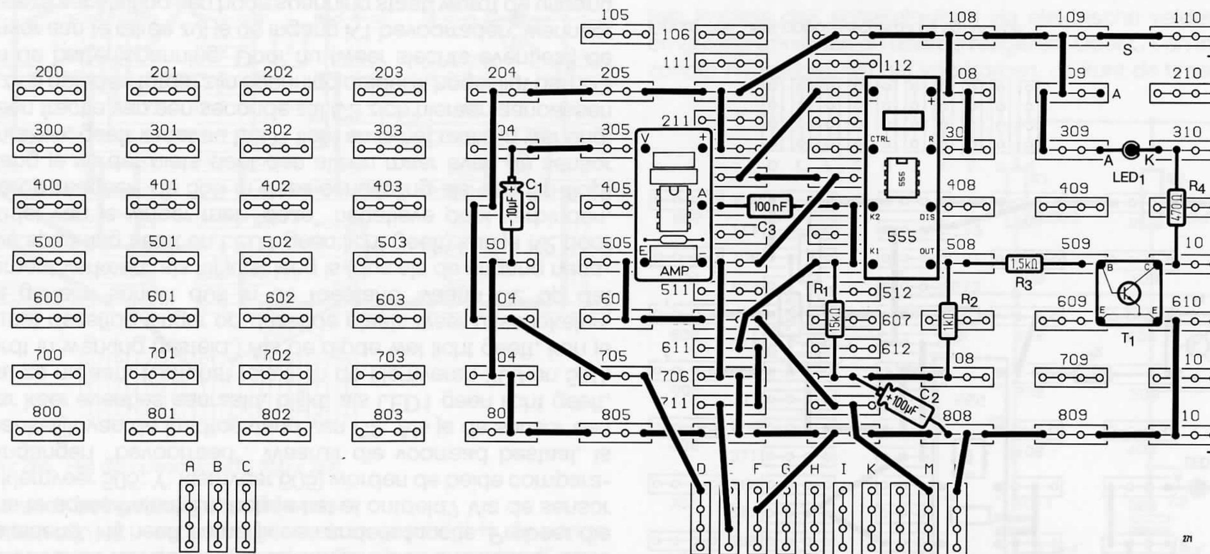


Figuur 268. Een intelligente sensor: past zich aan de situatie aan (wisselcontact).





Figuur 270. Reageert op alles wat hij hoort: gevoelige omschakelaar met geluid-afstandsbediening.



Figuur 271. Het opbouwschema bij figuur 270.

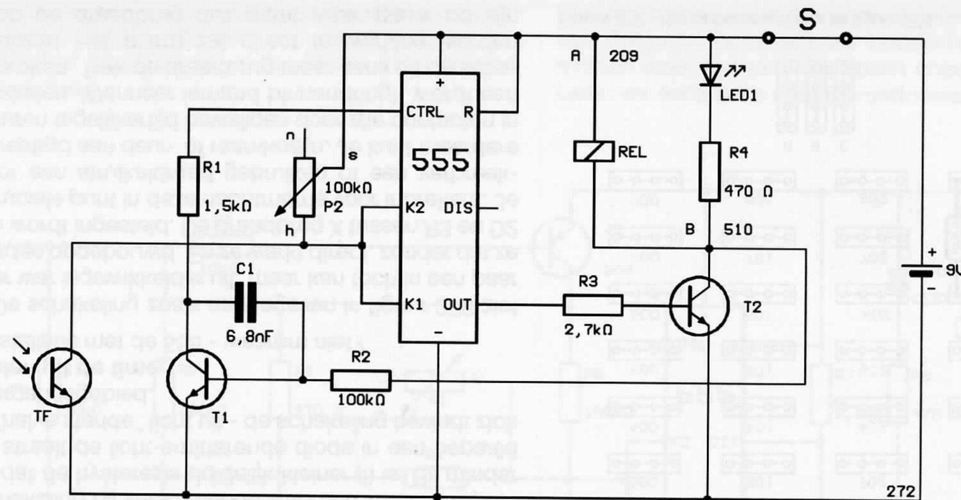
Praktische trucjes met de 555 als trigger

Nu gaan we opnieuw een bondgenootschap sluiten met de geesten. Tenminste, zo lijkt het voor iemand die nog niet vertrouwd is met onze trucs. Geluid en licht zijn onze assistenten. Die schakelen alles wat het KOSMOS-netschakelapparaat maar aankan. En dat is behoorlijk wat.

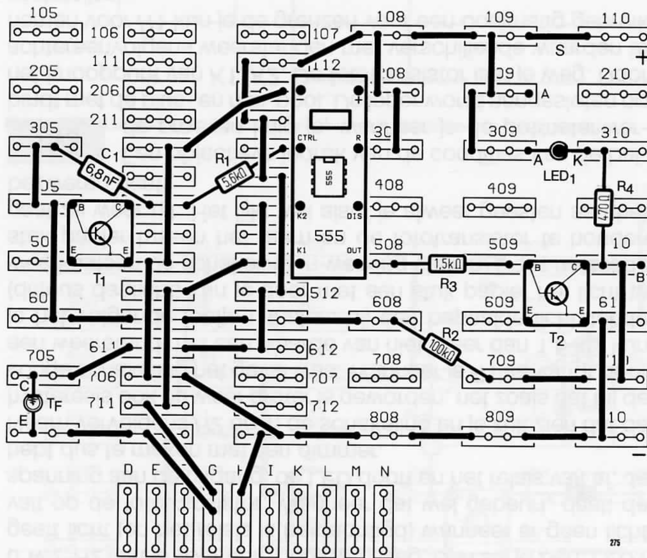
196 De AMP, met minimale toerusting en ingesteld op maximale versterking, de luidspreker (nu als geluidsopnemer), een vermogens-schakeluitgang aan de 555 - dat gaan we nu allemaal opbouwen volgens de aanwijzingen in figuur 271.

Draai P1 op tot het midden. Van nu af aan kun je gereedschap maar beter zachtjes op tafel neerleggen en niet meer in de handen klappen. Tenzij om het resultaat van je werk te testen. Dan wordt de schakeling namelijk in- of uitgeschakeld - al naar gelang de toestand waarin de schakeling zich bevindt. Hier kun je wel een hele avond mee bezig zijn. En toch is het (nu) allemaal heel gemakkelijk te begrijpen: SP neemt geluid op. Zijn spoel beweegt in het magnetisch veld en levert daardoor (hooguit) een paar millivolt met geluidsfrequentie aan de AMP-ingang E. Die zorgt ervoor dat de spanning 5000 keer wordt versterkt. Verder heb je nog de terugkoppeling via *R*1 en *R*2, enigszins vertraagd door *C*2. Deze truc maakt het geheel bijzonder gevoelig. Dat P1 is ingesteld op de middenpositie wil namelijk niet zeggen dat er op de loper een spanning staat die eenvoudigweg de helft bedraagt van de batterijspanning. Nee, de bestaande uitgangsspanning (ongeveer 1,4 V lager dan de batterijspanning respectievelijk vrijwel gelijk aan nul, al naar gelang de toestand) laat met *C*2 als reservoir het werkpunt steeds opschuiven tot in de buurt van de triggerdrempel die bereikt moet worden, als het volgende geluid weerklinkt, om ervoor te zorgen dat OUT kipt. De enorm versterkte laagfrequente spanning krijgt dat voor elkaar. K1 respectievelijk K2 reageert, de uitgang wordt omgepoold en *C*2 volgt dat voorbeeld. Als er dan opnieuw een geluid weerklinkt dat hard genoeg is, wordt het geheel weer gekipt naar de vorige toestand. Die verschuiving mag je echter niet te ver doorvoeren, bijvoorbeeld door de waarde van *R*1 te verlagen. Anders zou de schakeling wel eens vanzelf kunnen kippen!

197 Een *lichtgestuurde, voor contact zorgende schakelaar* is afgebeeld in figuur 272. Nadat je de schakeling hebt opgebouwd stel je P2 voorlopig in op de middenpositie. Sluit vervolgens de batterij aan. De licht-emitterende diode blijft donker zolang er geen licht valt op de fototransistor (TF). Door de lichtstraal van een zaklantaarn of iets dergelijks op de fototransistor te richten kun je LED1 inschakelen (of parallel daaraan een willekeurig apparaat via het KOSMOS-netschakelapparaat X). Als het licht uitvalt, wordt ook het relais uitgeschakeld. Door middel van T1 kun je de hysteresis van de

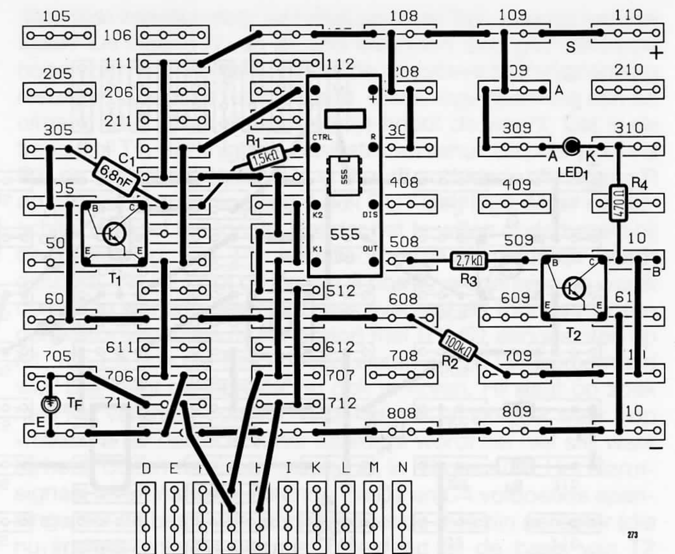


Figuur 272. Inschakelen door lichtinwerking: dank zij de grote hysteresis (*R*1 tussen 1,5 kΩ en 10 kΩ) geschikt voor verlichting met automatische houdschakeling.

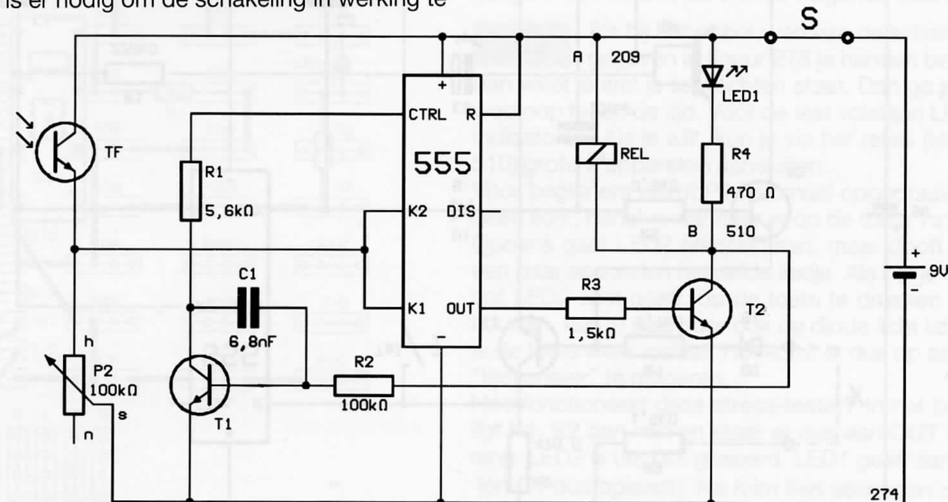


Figuur 273. Het opbouwschema bij figuur 272.

schakeling vergroten. Wanneer de spanning aan de uitgang OUT gelijk is aan nul, is T1 geopend en gelden er lagere drempelwaarden. De hoogte daarvan wordt bepaald door *R*1. Zodra de lichtafhankelijke collectorstroom van de fototransistor zodanig is toegenomen dat de spanning over P2 meer bedraagt dan 2/3 van de batterijspanning, kipt de 555 naar hoge uitgangsspanning. Daardoor wordt T2 geopend en het relais (klemveren 209 en 510) in werking gesteld. De nu lage collectorspanning van T2 spert echter T1 zodat vanaf dit moment de "normale" triggerdrempels gelden. Dat wil zeggen dat de lichtintensiteit tot ruim onder het vorige aanspreekniveau moet dalen voordat de 555 terugkipt en het relais buiten werking stelt. Door middel van P2 kun je de lichtgevoeligheid van de schakeling instellen: hoe hoger de ingestelde waarde, des te minder licht is er nodig om de schakeling in werking te stellen.



Figuur 275. Het opbouwschema bij figuur 274.



Figuur 274. Uitschakelen door lichtinwerking: dimmer met verbrede hysteresis.

198 De schakeling zoals weergegeven in figuur 274 is de tegenhanger van de schakeling die we zoëven hebben onderzocht. Dat merk je zodra je de batterij aansluit. Je hoeft trouwens ook niet veel aan de opbouw te veranderen. Om te beginnen stel je P2 weer in op de middenpositie. Omdat het niet te licht mag zijn in de kamer, kun je het beste 's avonds testen. Wat je gaat testen, is de reactie op het licht van een zaklantaarn. Dat doe je eerst weer zonder de aftakking met T1, d.w.z. *R*2 laat je voorlopig nog even weg. Dan zul je zien: LED1 geeft licht (en het relais is bekrachtigd) wanneer er geen licht valt op de fototransistor. Wanneer dat wel gebeurt, daalt de spanning aan de uitgang, de LED dooft en het relais valt af. Je hebt dus te maken met een dimmer.
Neem vervolgens *R*2 op in de schakeling en je zult zien dat de hysteresis ook nu weer groter is geworden, net zoals dat bij de vorige schakeling het geval was. Wanneer je *R*1 vervangt door een weerstand met een waarde van niet meer dan 1,5 kΩ kun je het volgende foefje uithalen: bij een bepaalde lichtsterkte (diffuus daglicht) kun je door met een stuk papier het licht te weerkaatsen de schakeling in werking stellen. Door hetzelfde stuk papier tussen het raam en de fototransistor te houden gaat ze weer uit. Het lijkt wel alsof je alweer geesten aan het bezweren bent!

199 Een objectieve indruk van de condities van de beide proeven krijg je, wanneer je de potmeter verbindt met de plus- en min-pool. De loper wordt aangesloten op het knooppunt van *K*1, *K*2. De fototransistor laat je weg. Door achtereenvolgens weerstanden met verschillende waarden te nemen voor *R*1 kun je de grenzen voor een doelmatig gebruik vaststellen.

200 We verbinden *R*2 met de uitgang OUT in plaats van met de collector van T2 en onderzoeken de reactie in de testschakeling bij verschillende waarden van *R*1. Bij 5,6 kΩ zien we dat de hysteresis duidelijk kleiner (!) is. Bij minder dan 3,3 kΩ straalt de licht-emitterende diode in een bepaald bereik met "halve sterkte" licht uit - de schakeling bevindt zich nu in de overgangsgebied.

Alarmsignalen uit de timer

Een alarminstallatie met de 555 - waarom niet?

201 De schakeling zoals aangegeven in figuur 276 ziet er wat ingewikkelder uit, maar kan toch in een paar minuten worden opgebouwd. En ze werkt direct, zonder dat ze van te voren wordt ingesteld. De draadbrug X tussen *R*3 en D2 vormt het cruciale punt in deze nachtmerrie voor inbrekers. Je kunt hiervoor een struikeldraad gebruiken of een verbreekcontact, bevestigd aan deur- of raamkozijn. Je kunt meerdere ramen of deuren tegelijkertijd beveiligen door alle contacten in serie te schakelen. Wanneer iemand binnendringt, wordt een contact verbroken. Trek de draadbrug maar eens uit de schakeling en luister! Het alarm zal direct in werking worden gesteld. Stop de draadbrug dus maar weer gauw op zijn



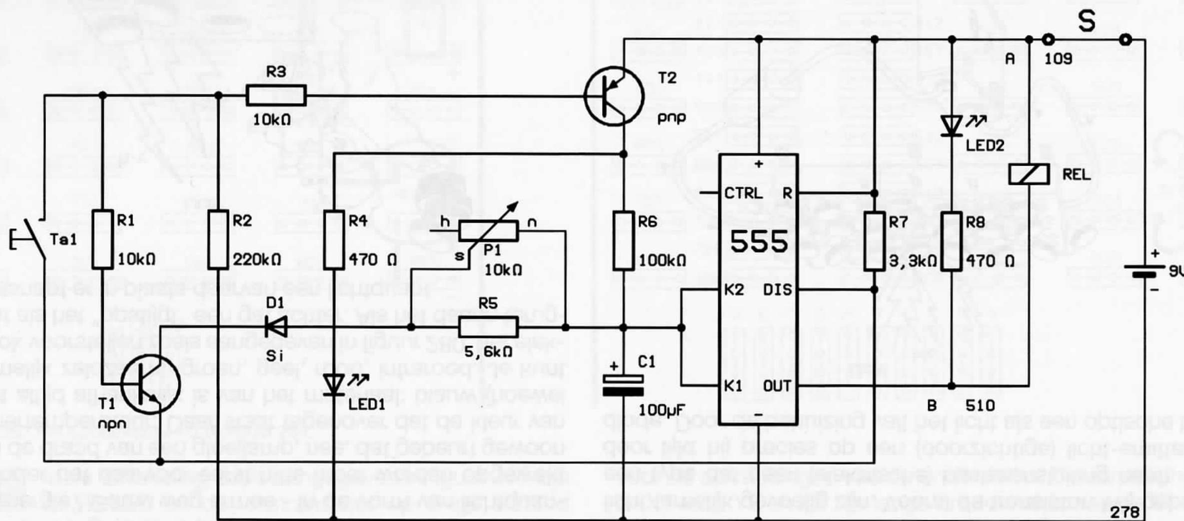
Figuur 276. Hinderlaag voor inbrekers: alarminstallatie met automatische houdschakeling.



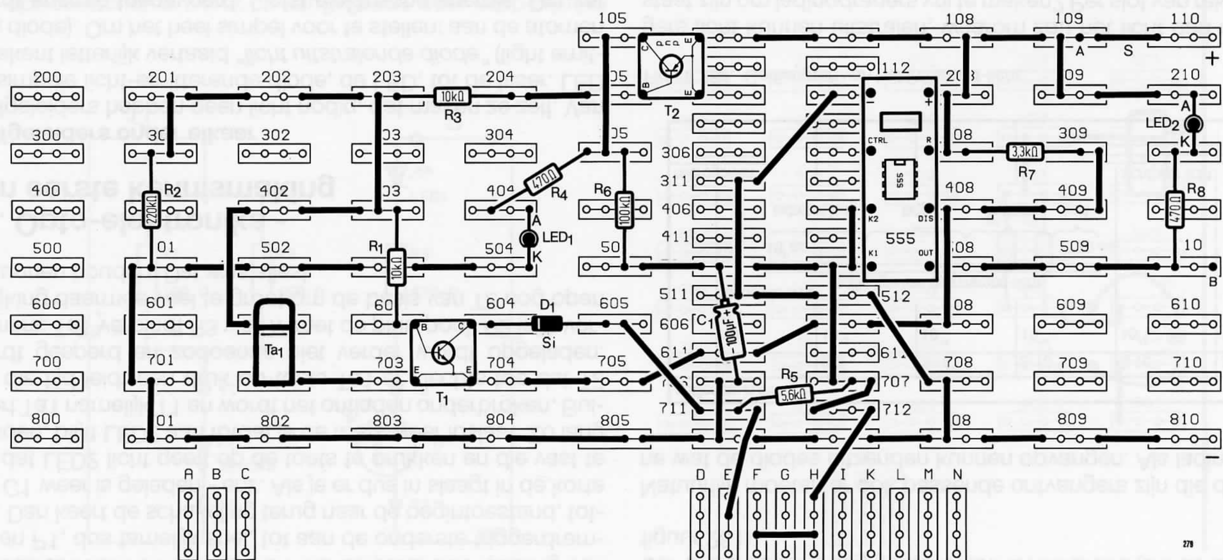
Figuur 277. Het opbouwschema bij figuur 276.

plaats! Maar dat helpt niet: het alarmsignaal weet van geen ophouden. Alleen degene die met de alarminstallatie vertrouwd is kan door een druk op de resettoets Ta1 een eind maken aan het lawaai.

Een alarminstallatie is pas echt effectief als ze is uitgerust met een dergelijke automatische houdschakeling die we zojuist hebben leren kennen. Hoe speelt onze schakeling dat klaar? Laten we eerst eens naar de rusttoestand kijken: die kun je te allen tijde instellen door een druk op toets Ta1. Hoe zat het ook weer? De ingang R van de 555 inverteert. Een geïnverteerde hoge spanning die gelijk is aan de negatieve batterijspanning resulteert dus in de rusttoestand, d.w.z. lage spanning aan de uitgang OUT. Alles slaapt - eentje houdt de wacht. Dat is de transistor T1. Die krijgt zijn basisstroom vanuit de puls-pool via *R*3, de draadbrug X, D2, *R*4 en houdt zodoende de ingang R op negatieve spanning zodat ook OUT laag blijft. Maar nu verschijnt de boef ten tonele. Zonder het te willen onderbreekt hij de basiskring van T1, waardoor deze onmiddellijk wordt gesperd. Via *R*2 krijgt de ingang R positieve spanning en wordt de 555 in werking gesteld. Die is evenwel als toonfrequentiegenerator (astabiele multivibrator) met *R*1, *C1* aangesloten op K1, K2. En hoe die functioneert weten we zo langzamerhand wel. Dat krijgt de inbreker nu ook te horen. Hij gaat op zoek naar het verbreek-contact, vindt het ook en sluit het weer - op welke manier dan ook. Maar daardoor wordt het niet stil, want hij heeft buiten de waard gerekend, in dit geval T2. Het alarmsignaal levert namelijk ook nog via D1 en *C*4 voldoende spanning voor de basis van T2 die zodoende met zijn collector (die nu immers volledig negatief geleidend is) de basis van T2 spert. Nadat de politie is gewaarschuwd en de dader is gearresteerd, hoeven we nog maar drie dingen te doen: de basiskring voor T1 weer sluiten, door een druk op toets Ta1 het alarm opheffen en weer naar bed gaan. T1 blijft op wacht.



Figuur 278. Gewoon een kwestie van zenuwen: reactietest in het tijdvenster.



Figuur 279. Het opbouwschema bij figuur 278.

Psychische belasting

Vooral die toestand met het alarm heeft ons toch wel aangegrepen. Zeker na al die andere spannende proeven die eraan voorafgingen. En nu gaat de 555 ook nog de psychiater uithangen. Tenminste, als we het volgende doen.

202 Als bij het opbouwen van de schakeling zoals aangegeven in figuur 278 je handen beginnen te trillen, dan weet je wat je te wachten staat. Dan ga je verliezen in de wedloop tegen de tijd. Voor de test volstaan LED1 en LED2 als indicatoren. Als je wilt, kun je via het relais (klemveren 109 en 510) grotere apparaten aansluiten.

Voor beginners wordt P1 helemaal opgedraaid (s op h). LED1 geeft licht, behalve wanneer er op de toets Ta1 wordt gedrukt. Opeens gaat LED2 (vanzelf) aan, maar dooft direct weer. Na een paar seconden hetzelfde liedje. Als het je lukt om in de tijd dat LED2 licht geeft, op de toets te drukken en deze vast te houden, kun je daardoor ook de diode licht laten geven totdat je de toets weer loslaat. Het komt er dus op aan om binnen dit "tijdvenster" te reageren.

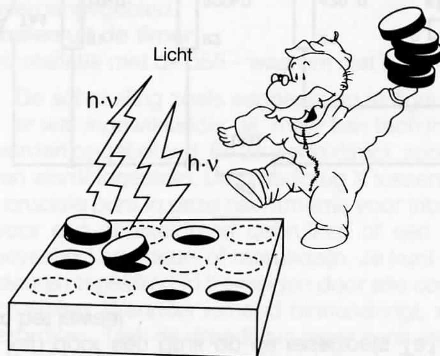
Hoe functioneert deze stress-tester? In het begin is *C*1 leeg, ligt K1, K2 aan min en staat er dus aan OUT een hoge spanning. LED2 is uit, DIS gesperd. LED1 geeft aan dat T2 actief is (en *C*1 dus oplaadt). Na ruim tien seconden is het dan zover: de spanning over *C*1 bereikt de bovenste triggerdrempel, OUT en DIS worden negatief geleidend. LED2 geeft licht. De emitter

van T1 is nu via DIS verbonden met de min-pool. T1 krijgt via *R*1 basisstroom en ontlaadt *C*1 via de parallelschakeling van *R*5 en P1, dus tamelijk snel, tot aan de onderste triggerdrempel. Dan keert de schakeling terug naar de begintoestand, totdat *C*1 weer is geladen - enz. Als je er dus in slaagt in de korte tijd dat LED2 licht geeft op de toets te drukken en die vast te houden, blijft LED2 aan totdat je de toets weer loslaat. Zo lang spert Ta1 namelijk T1 en wordt het ontladen onderbroken. Buiten die tijd leidt een druk op toets Ta1 er slechts toe dat T2 wordt gesperd en zodoende niet verder wordt opgeladen. Immers: Ta1 verbindt *R*3 via *R*7 met de plus-pool. *R*2 is in vergelijking daarmee veel te groot om de basis van T2 nog open te kunnen houden. Dat was alles!

21. Opto-elektronika - een eerste kennismaking

Halfgeleiders onder elkaar

Halfgeleiders hebben geen licht nodig, dat maken ze zelf. Van de simpele licht-emitterende diode, de LED, tot de laser. LED betekent letterlijk vertaald *"licht uitstralende diode"* (light emitting diode). Om het heel simpel voor te stellen: aan de atomen wordt energie toegevoerd. Liefst elektrische energie. Dat zet de elektronen ertoe aan een hoger "niveau" van energie op te zoeken. Op dat niveau houden ze niet lang stand. Ze vallen terug in hun vorige toestand. Maar wat te doen met de nu overtollige energie? Gauw weg ermee - in de vorm van lichtquanten. Zonder dat daarvoor eerst hitte moet worden opgewekt zoals in de draad van een gloeilamp, nee, dat gebeurt gewoon op kamertemperatuur. Daar staat tegenover dat de kleur van het licht altijd afhankelijk is van het materiaal: blauw (hoewel nog tamelijk zeldzaam), groen, geel, rood, infrarood. Je kunt het je ook voorstellen zoals aangegeven in figuur 280: het elektron laat als het "opstijgt" een gat achter. Als het daarin terugvalt, ontsnapt er in plaats daarvan een lichtquant.



Figuur 280. Door de "recombinatie" van een elektron met verhoogde energie en een gat komt er een lichtquant vrij (h•v).

Voor de "interne onderlinge" communicatie maken halfgeleider-onderdelen graag gebruik van het infrarood (zie de tabel in figuur 281).

Natuurlijk moeten er ook passende ontvangers zijn die datgene wat de diodes uitzenden kunnen opvangen. Als ladingdra-

golflengte in mm						
	3	0,3	$3 \cdot 10^{-2}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$
frequentie in Hz	10^{11}	10^{12}	10^{13}	10^{14}	10^{15}	10^{16}

golflengte van de infrarood-licht

10^{6} nm … 770 nm

extreem lang · lang · midden · kort

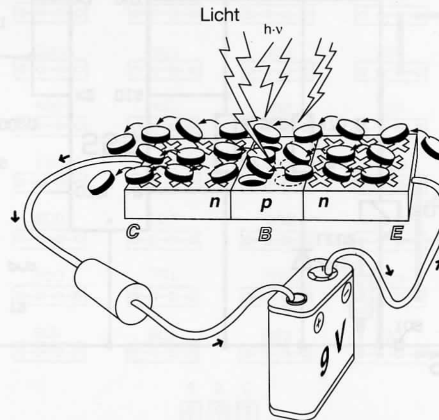
microgolven

zichtbaar licht

rood

Figuur 281. Golflengten van het infrarood-licht.

gers licht kunnen uitstralen, waarom zou het licht dan niet in staat zijn om ladingdragers vrij te maken? Per slot van rekening gaat het altijd slechts om het omzetten van energie van de ene vorm in de andere. Dat brengt ons bij de "andere kant". Bij fotodiodes en fototransistors, die allebei juist voor infrarood licht tamelijk gevoelig zijn. Vooral de transistor. Wij gebruiken een type dat geen (elektrische) basisaansluiting heeft. Daardoor lijkt hij precies op een (doorzichtige) licht-emitterende diode. Door de behuizing valt het licht als een optische basis-



Figuur 282. Lichtinval op de basis: ladingdragers komen vrij.

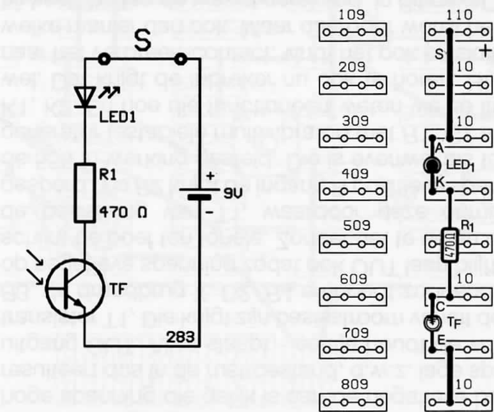
stroom op de transistor en maakt in de basiszone bij de pn-overgangen ladingdragers vrij (figuur 282).

Als we de fototransistor ook nog op een werkspanning en een belastingsweerstand trakteren, kan de collectorstroom vloeien en de optische boodschap daarin verder worden verwerkt. Alles wat je kunt doen met combinaties van lichtzenders en lichtontvangers wordt aangeduid met de fraaie naam *opto-elektronika*. Om je een heel klein beetje een indruk te geven van de mogelijkheden van de opto-elektronika gaan we de volgende experimenten uitvoeren.

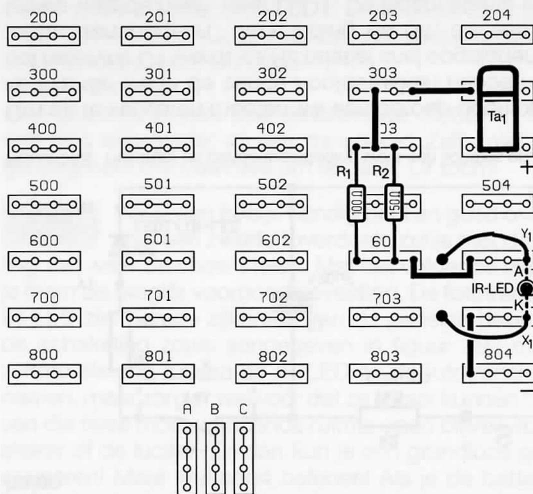
Who is who?

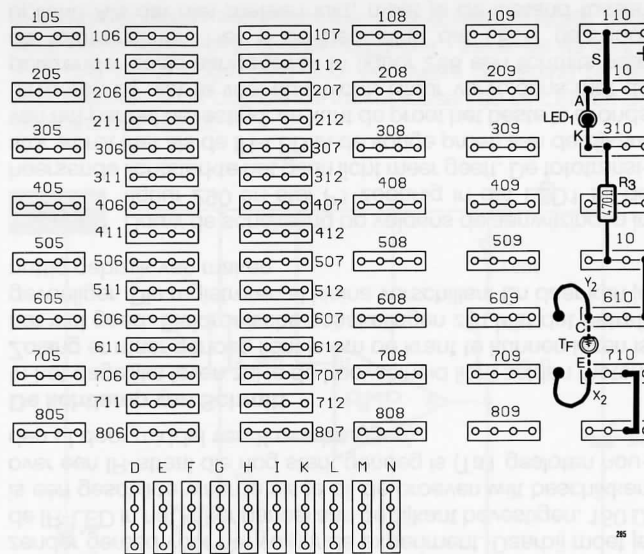
Om er helemaal zeker van te zijn dat je gebruik maakt van het juiste onderdeel voor het juiste doel in de juiste positie kun je de fototransistor (TF) maar het beste met een beetje verf aan de zijkant van de behuizing markeren om hem te onderscheiden van de infrarood-zenddiode (IR-LED). Welke de een is en welke de ander blijkt uit de volgende "kennismakingsproef".

203 Stop de ongelijke broertjes één voor één in de schakeling die je hebt opgebouwd volgens de aanwijzingen in figuur 283. Met het korte pootje steeds in de richting van *R*1. Dan kun je het te testen onderdeel het beste met een tafellamp op ongeveer 50 cm afstand verlichten. Het kan ook met een zaklantaarn met een behoorlijk sterke lichtstraal. Zelfs in een dergelijke lichte omgeving zul je waarschijnlijk nog goed kunnen zien dat LED1 oplicht. De diode licht laten uitstralen, dat lukt alleen de fototransistor. Ter beloning krijgt hij een gekleurde stip aan de collectorkant (collector = *korte* aansluiting). Dat andere onbekende onderdeel dat er bijna net zo uitziet, is dus de IR-LED (korte aansluiting = kathode). De IR-LED werkt bijna net zo als een gewone LED. Alleen kunnen wij het licht dat zij uitstraalt met onze ogen niet zien. Voor het opvangen van deze infrarood-straling zorgt de fototransistor.



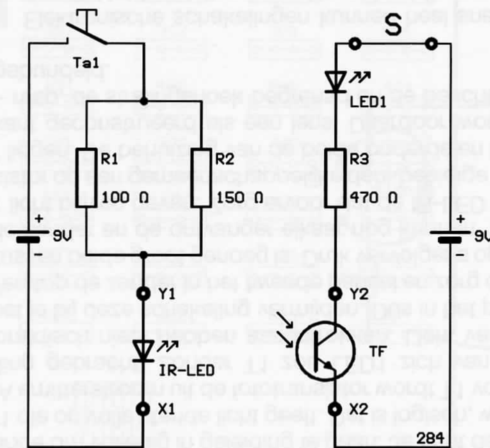
Figuur 283. Licht stuurt stroom: testschakeling voor de fototransistor.



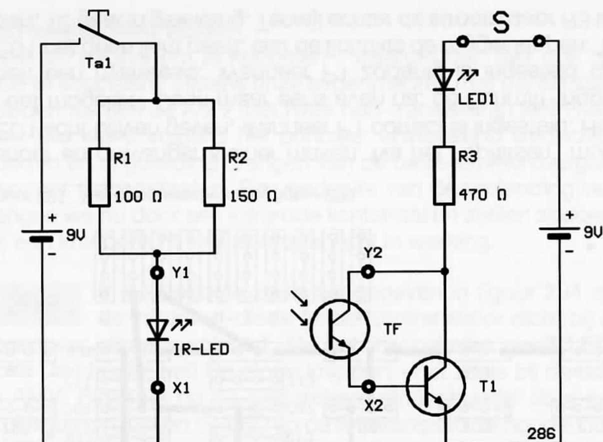


Figuur 285. Het opbouwschema bij figuur 284.

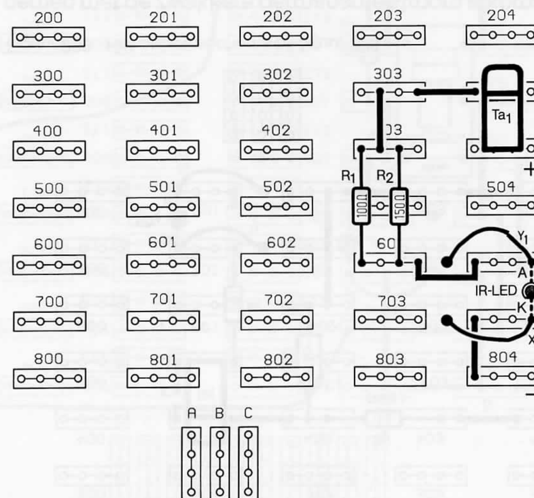
204 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 285 zijn de IR-LED en de fototransistor op enige afstand tegenover elkaar geplaatst. We doen dat door de IR-LED op de montageplaat van het linker paneel en de fototransistor op de montageplaat van het rechter paneel te bevestigen (s. S. 11). In het opbouwschema wordt dit aangegeven door stippellijntjes voor de aansluitingen van de onderdelen. De aansluitingen Y1 en X1 resp. Y2 en X2 zijn lange draden waarmee de IR-LED en de fototransistor worden aangesloten wanneer deze aan de zijkanten van de panelen zijn bevestigd. De draden worden dan door de gaatjes geleid die zich tussen de klemveren bevinden. We drukken op toets Ta1 en zien dat LED1 tamelijk helder oplicht. Om te bewijzen dat dit inderdaad wordt veroorzaakt door het infrarode licht moet je maar eens een stukje karton in de stralenbundel houden. Wedden, dat LED1 onmiddellijk dooft? En al druk je nog zo hard op de toets - de onzichtbare krachten zijn met een trucje uitgeschakeld.

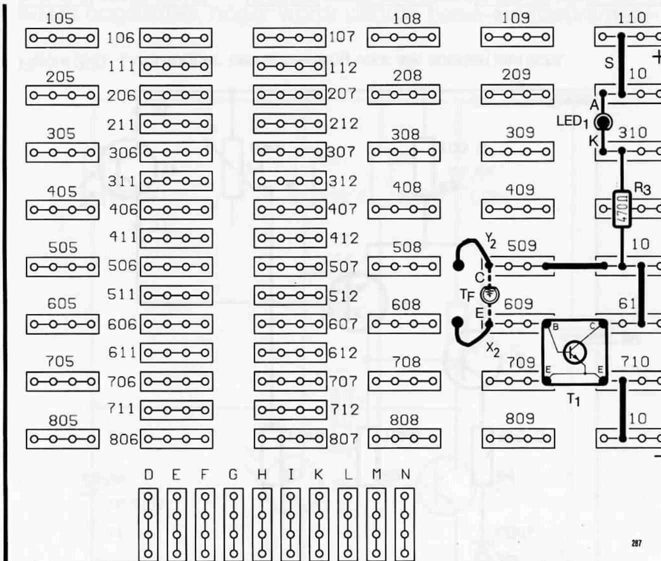


Figuur 284. "Lichtomzetter": infrarood licht stuurt de LED via de fototransistor.



Figuur 286. "Lichtversterker": de Darlington-schakeling versterkt het lichteffect (de stroom).



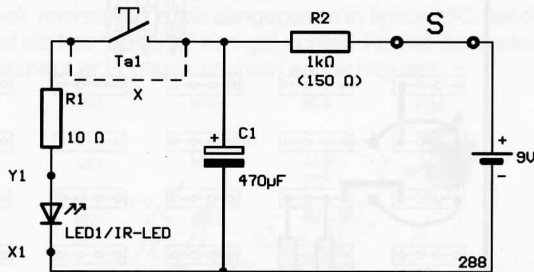


Figuur 287. Het opbouwschema bij figuur 286.

205 Voor de *foto-Darlington-schakeling*, zoals die rechts in figuur 286 is afgebeeld, is diffuus daglicht al voldoende om volledig in geleiding te gaan. Je kunt dat zien aan LED1 die op volle sterkte licht geeft. Dat is logisch, want al bij 100 µA emitterstroom uit de fototransistor wordt T1 volledig in geleiding gebracht. Zonder T1 zou LED1 zich van deze stroom praktisch niets hebben aangetrokken. Licht van buitenaf moet je bij deze schakeling vermijden. Dus in het paneel ermee! Verstop de zender in het tweede paneel en zorg dat de afstand tussen beide groot genoeg is. Druk vervolgens op Ta1. Zolang de zender en de ontvanger elkaar nog kunnen "zien", zal LED1 licht blijven geven. Zorg ervoor dat de IR-LED en de fototransistor op een gemeenschappelijke denkbeeldige "optische as" liggen. De behuizing van de beide onderdelen is aan de voorkant geconstrueerd als een lens. Daardoor wordt de gezichts- resp. de stralingshoek begrensd en de beschikbare energie gebundeld.

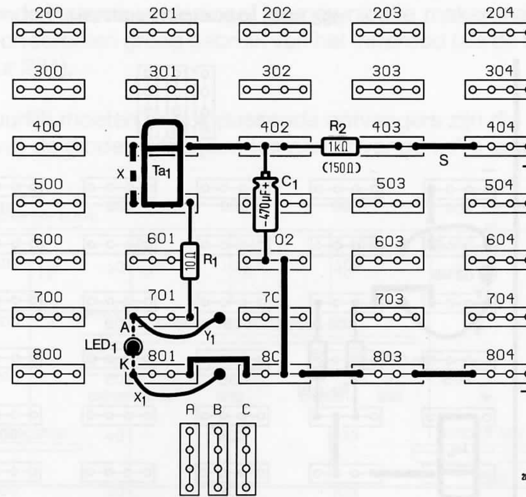
206 Elektronische schakelingen kunnen heel snel reageren. Het komt dus maar hoogst zelden voor dat je permanent licht nodig hebt. Om iets in werking te stellen is vaak een korte puls voldoende en om een toestand vast te houden pas je de intelligentie van de ontvangschakeling aan.

De schakeling aangegeven in figuur 288 kan zulke korte, intensieve lichtflitsen leveren. Rechtstreeks kun je dat het beste zien in een test met een gewone licht-emitterende diode. Neem daarom eerst LED1 in de schakeling op en druk vervolgens op de toets. De diode zal eerst opflitsen en daarna licht blijven geven, zij het met verminderde lichtintensiteit. Laat de toets los, wacht even en druk dan opnieuw: het proces zal zich herhalen.



Figuur 288. Pulstruc: de condensatorlading wekt een lichtflits op.

Om dit te verklaren moeten we een beroep doen op de basiskennis die we in de eerste hoofdstukken hebben opgedaan: het reservoir *C*1 wordt via *R*2 relatief snel opgeladen tot 9 V. De toets "transporteert" deze lading via *R*1, die een aanzienlijk lagere waarde heeft, naar LED1. De tijdconstante van het ontladen is veel kleiner dan van het laden. Vandaar dat LED1 slechts even fel opflitst. Daarna moet deze diode genoegen



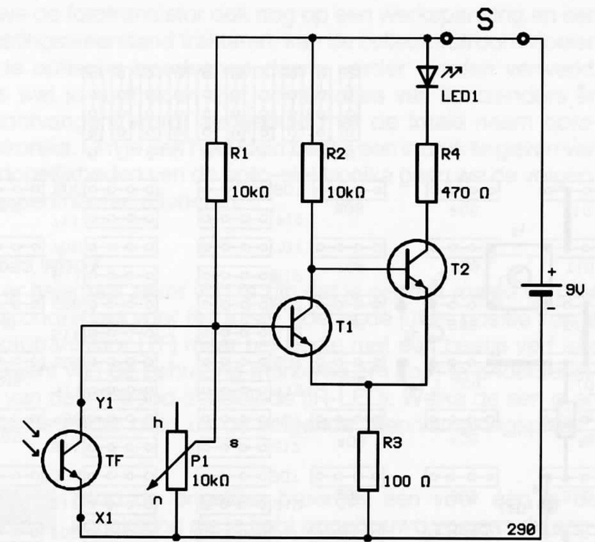
Figuur 289. Het opbouwschema bij figuur 288.

nemen met de zwakkere permanente stroom afkomstig van *R*2 totdat de toets Ta1 wordt geopend. Dan kan *C*1 weer worden opgeladen. Vervang *R*2 achtereenvolgens door een weerstand met een steeds hogere waarde tot een maximum van 15 kΩ en druk na elke wissel op Ta1! Ten eerste zal LED1 na het opflitsen geen licht meer geven, wanneer je op Ta1 blijft drukken. Ten tweede duurt het nu, nadat je Ta1 hebt losgelaten, aanzienlijk langer voordat er weer een behoorlijke lichtflits te zien is. Als je de schakeling vervolgens uitrust met de IR-LED en de waarde van de weerstand van *R*2 verlaagt tot 150 Ω, is deze zender gereed voor het volgende experiment. Daarbij moet je de IR-LED in het linker paneel aan de zijkant bevestigen. 150 Ω is een geschikte waarde als je bij de proeven wilt beschikken over een IR-straal die nog sterk genoeg is (Ta1 gesloten houden of door middel van X overbruggen).

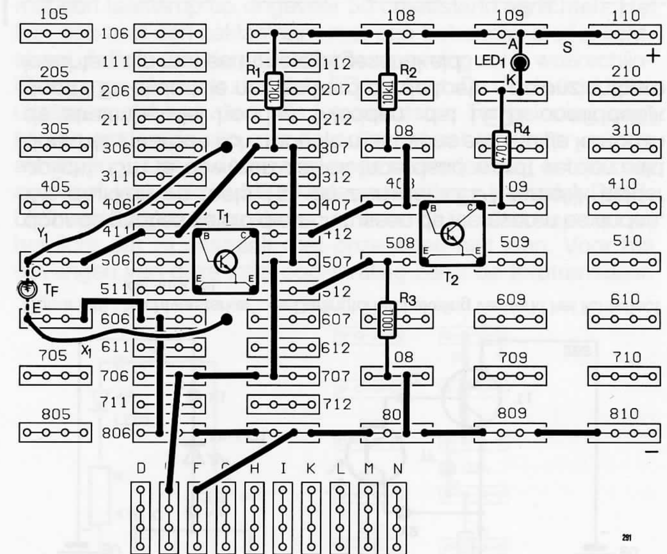
De lichtlamp van Schmitt

In het dagelijks leven zul je de hoeveelheid licht zelden meten. Zolang er maar genoeg licht is om de krant te kunnen lezen is het wel goed. Elektronische schakelingen zijn wat dat betreft gevoeliger. Die registreren al kleine verschillen. En daar kun je nuttig gebruik van maken.

207 Bouw de schakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 290 en stel P1 zodanig in dat LED1 bij de heersende lichtsterkte net geen licht meer geeft. De fototransistor wordt (net als de IR-LED in de vorige proef) aan de zijkant van het paneel bevestigd. Je kunt de proef het beste 's avonds uitvoeren bij niet te veel kunstlicht. Stuur vervolgens met de pulszender zoals aangegeven in figuur 288 een lichtflits naar de fototransistor. Het is de bedoeling dat LED1 daardoor oplicht. Als dat niet meteen lukt, moet je de afstand tussen



Figuur 290. Licht-trigger: een schakeling voor alle soorten van licht.



Figuur 291. Het opbouwschema bij figuur 290.

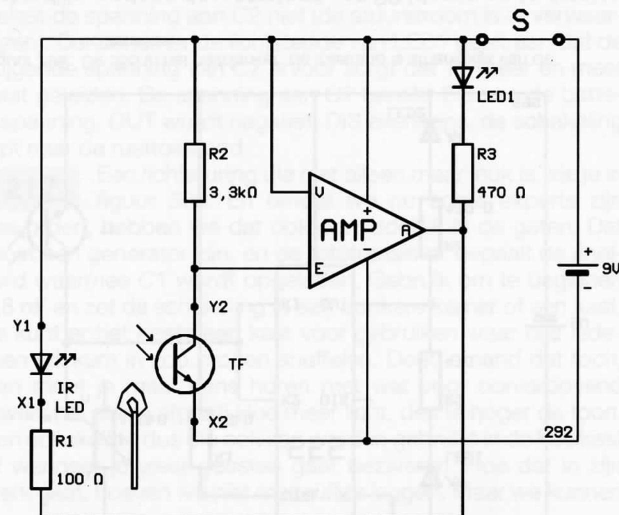
zender en ontvanger kleiner maken. Na het "opflitsen" moet LED1 licht blijven geven, wanneer P1 correct is ingesteld. Hoe is dat mogelijk? Denk maar eens even na: de Schmitt-trigger heeft een hysteresis. Wanneer P1 zodanig is ingesteld dat LED1 net geen licht geeft, laat de lichtflits de trigger kippen: T1 spert, T2 gaat in geleiding. Terwijl echter de stroom door *R*3 tot

nu toe werd bepaald door *R*2, krijgt T2 nu aanzienlijk meer stroom van *R*4 en LED1. De spanningsval over *R*3 is duidelijk hoger zodat T1 gesperd blijft. In ieder geval zolang, totdat de lichtsterkte voor de fototransistor niet meer voldoende is om deze toestand vast te houden.

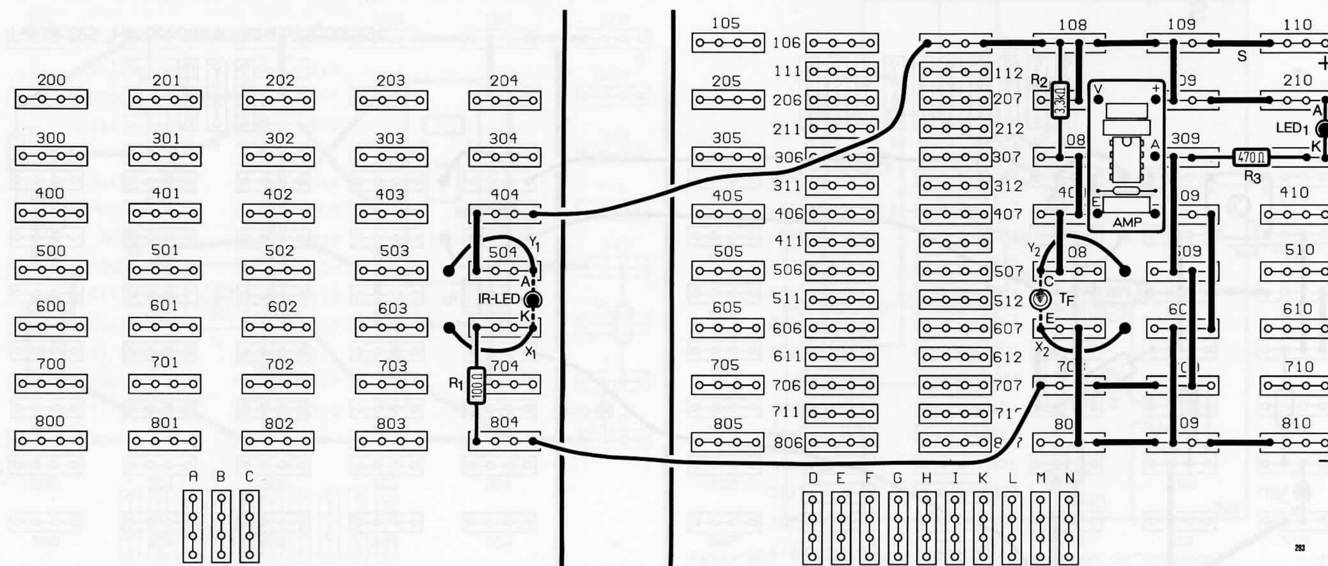
Licht-ontsteker

Hoe ontsteek je een licht-emitterende diode? In ieder geval niet met een lucifer of een aansteker! Zelfs niet als je oud genoeg bent om daarmee om te gaan. Of toch?

208 Als je een beetje handig bent en goed overweg kunt met een zwarte toverdoek, zul je met deze schakeling wel weer de show stelen. Met het volgende experiment is je faam als magiër voorgoed gevestigd. De fototransistor en de IR-LED zijn aan de zijkanten van de panelen bevestigd. Voor de schakeling zoals aangegeven in figuur 292 moet je een zekere afstand tussen de IR-LED en de fototransistor in acht nemen, maar zorg er wel voor dat ze elkaar kunnen "zien". Tussen die twee moet voldoende ruimte open blijven voor de aansteker of de lucifer. En dan kun je een grandioze goocheltruc opvoeren! Maar wel eerst oefenen! Als je de batterij aansluit kan het gebeuren dat de diode al vanzelf oplicht. Dat kun je ongedaan maken door *R*1 even uit de klemveer te trekken. Maar je kunt ook een condensator van 100 µF parallel schakelen aan de IR-LED (verbind dan de min-pool van de elco met de kathode). De kleine hoeveelheid stroom die bij het inschakelen uit de AMP komt wordt dan om de IR-LED heen geleid totdat de elco is opgeladen. De diode zal dan hoogstens nog even kort opflitsen. Het effect van je goocheltruc wordt door deze kleine aanpassing beslist nog groter - zeker als de spanning nog wordt opgevoerd door een korte vertraging bij het ontsteken als je de brandende lucifer tussen de IR-LED en de fototransistor houdt.



Figuur 292. Verboden voor onbevoegden: een licht-emitterende diode ontsteken met een lucifer.

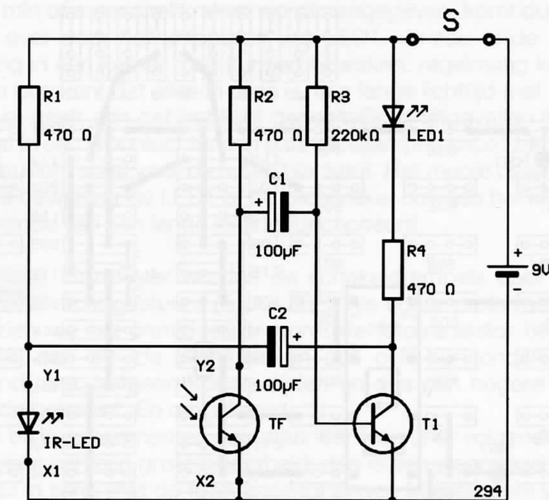


Figuur 293. Het opbouwschema bij figuur 292.

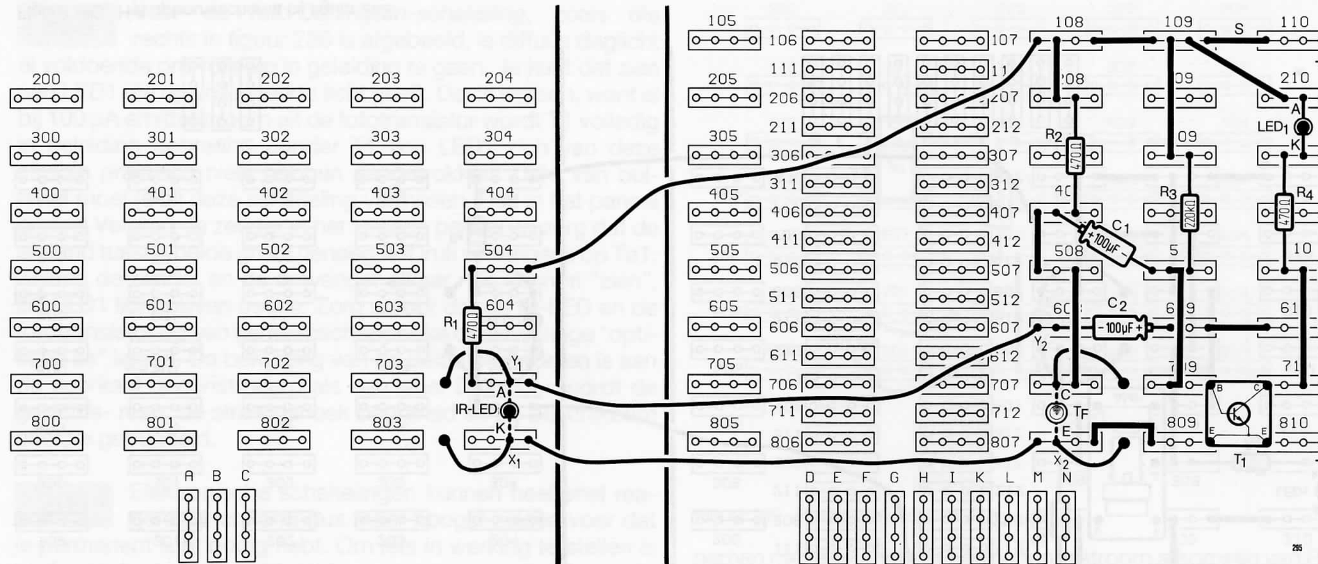
Een schitterend vibrato

Licht als middel om te koppelen - waarom dan niet ook om *mee* te koppelen? Tijdens onze experimenten met transistoren hebben we ook de AMV met twee npn-transistoren leren kennen. Die werkt volgens het principe: afwisselend wederzijds sperren en in geleiding brengen van de basis-emitterovergangen met tijdconstanten. Een gedeelte van de verbinding vervangen we nu door een infrarode lichtstraal en stellen zodoende een knipperlicht met zichtbaar licht in werking.

209 In de opbouw zoals aangegeven in figuur 294 zijn de infrarood-diode en de fototransistor dicht bij en tegenover elkaar geplaatst. Na het inschakelen geeft LED1 licht. Dan begint het! De diode knippert - net zoals bij de echte AMV. Blokkeer nu de onzichtbare stralenbundel door een stukje karton tussen IR-LED en de fototransistor te houden: uit! Of beter gezegd: aan. Want LED1 geeft nu permanent licht. Dat is niet verwonderlijk, want de basisstroom voor T1 vanuit *R*3 wordt nu niet meer beïnvloed door de voortdurende wisseling in het spel van de tijdconstanten. Als je de blokkade opheft gaat de diode weer knipperen. De fototransistor vangt IR-licht op, begint te geleiden en legt de intussen via *R*2 en de basis-emitterovergang van T1 opgeladen *C*1 met de plus-kant aan negatieve spanning. Daardoor wordt T1 gesperd. Dit leidt ertoe dat *C*2 aan de plus-kant wordt "verhoogd": hij wordt via LED1, *R*4 en de IR-LED opgeladen, die hij daardoor van stroom voorziet, terwijl de fototransistor volledig in geleiding wordt gebracht. Totdat de spanning aan *C*1, die vanuit *R*3 wordt opgeladen, hoger wordt dan de basis-emitterdrempel-



Figuur 294. Positieve terugkoppeling via het infrarood: multivibrator met ondersteuning van infrarood licht.



Figuur 295. Het opbouwschema bij figuur 294.

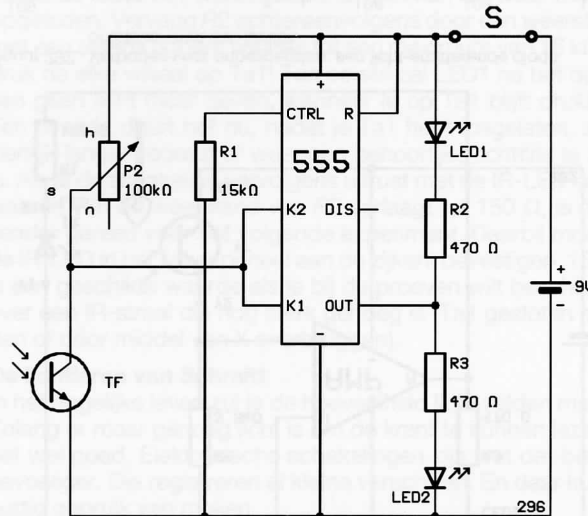
spanning van T1. Vervolgens gaat T1 weer geleiden en die zal dan zelfs tijdelijk de stroom van de IR-LED via *C2* aftakken. Al met al levert dat een behoorlijk sterk knipperlicht op zolang het wisselen dank zij de optische koppeling doorgaat.

Het principe van de koppeling tussen IR-LED en fototransistor (bij hogere frequenties fotodiode) wordt toegepast bij een bepaald soort bouwelementen die *opto-elektronische koppelaars* worden genoemd. Die zijn ideaal voor het geval dat informatie-overdracht moet plaatsvinden zonder contacten resp. zonder gebruik van elektrische leidingen. Daarmee kunnen veel problemen bijna vanzelf worden opgelost.

De 555 in een nieuw licht

Zonder de 555 kom je er niet, ook niet in de opto-elektronika. Dat blijkt uit de volgende experimenten.

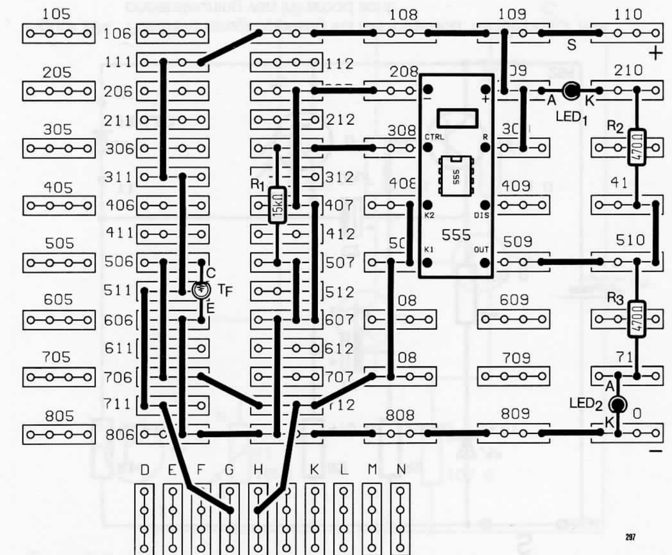
210 Bouw de testschakeling op volgens de aanwijzingen in figuur 296 en let op de reactie. De 555 functioneert hier als drempelwaardeschakelaar. P2 wordt eerst helemaal ingeschakeld (s op n). Als LED1 nu licht geeft, is het in de kamer te donker. Graag dus wat meer licht, a.u.b. (draai bijvoorbeeld de lamp boven de tafel aan). Nu dooft LED1 en licht LED2 op. Dek vervolgens de fototransistor af (met je hand, een stuk karton of een zwarte doek): dan licht LED1 op. Een echte *dimmer* dus. Waar zou jij het relais aansluiten waarmee in het donker een lamp ingeschakeld kan worden? Precies - in de bovenste tak (klemveren 109 en 410). En moet dat dan pas gebeuren bij een geringere lichtsterkte dan wij zouden willen?



Figuur 296. De 555 in het halfdonker: de toestand is afhankelijk van de lichtsterkte.

Natuurlijk - verlaag de weerstand van P2 (door s op te draaien in de richting van h). En de hysteresis? Die hebben we al bij het opbouwen verlaagd door in de schakeling *R*1 op te nemen vóór de CTRL-ingang. Hoe een dergelijke schakeling met een 555 in zijn geheel functioneert, hebben we al in het vorige hoofdstuk uitvoerig behandeld.

Twee dingen nog met betrekking tot de "optiek". Ten eerste:



Figuur 297. Het opbouwschema bij figuur 296.

gloeilampen die zijn aangesloten op het wisselspanningsnet worden 100 keer per seconde in- en uitgeschakeld. Dat heeft ook invloed op de lichtgevoelige collectorstroom van de fototransistor. Zolang de daardoor opgewekte "brom"-spanning echter onder de waarde van de laagste drempelspanning blijft, zal de schakeling foutloos functioneren. Ten tweede: als je de fototransistor vlak bij een sterke lichtbron houdt, moet je P2 niet helemaal opdraaien tot bij de aanslag h. Tenzij je een beveiligingsweerstand van bijvoorbeeld 470 Ω tussen h en de plus-pool aanbrengt.

211 Fotograferen is tegenwoordig doodsimpel. Dat is te danken aan voorzieningen zoals die waarvan je een afbeelding vindt in figuur 298. De lichtgevoelige film reageert zoals bekend op een bepaalde hoeveelheid licht: hoe meer licht, des te sneller wordt het negatief zwart. Daarom moet je de belichtingstijd kunnen instellen. Daarvoor zorgt een tijdbesturing met fototransistor. Bouw de experimenteerschakeling op en houd LED2 in het oog. Daar zit in het echt de elektromagneet voor de sluiter.

Eerst gebeurt er helemaal niets. Op de ontspanner drukken is iets wat je in ieder geval nog zelf moet doen - zó automatisch is deze automatische schakeling nou ook weer niet. Druk dus op Ta1. LED2 gaat aan - de sluiter is geopend. Dan licht ook LED1 meer of minder snel op en vervolgens doven de beide licht-emitterende diodes. Meer of minder snel - dat is namelijk afhankelijk van de belichting van de fototransistor. Kijk eens wat er gebeurt als je de fototransistor verduistert: nadat je hebt

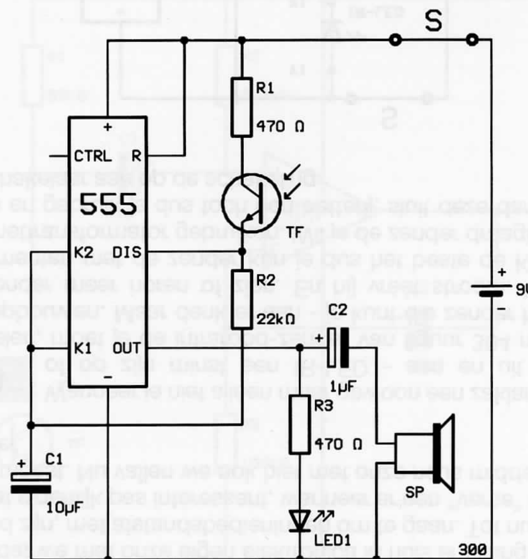
ingeschakeld zal het heel lang duren voordat LED1 op volle sterke licht geeft en het proces voltooid is. In dat geval zou je een vaste hand moeten hebben om de camera te bedienen. Maar wat gebeurt er als de fototransistor het volle licht krijgt: nauwelijks heb je ingeschakeld of het plaatje is al geschoten. Klik.

Figuur 298. Lichtdoseringsschakelaar: model van een sluitersturing van een camera met "verloopindicatie".

Figuur 299. Het opbouwschema bij figuur 299.

Beschrijving van het proces in telegramstijl omdat we het allemaal al hebben gehad: K2 positief, K1 negatief (*C*2 nog leeg), dus OUT en DIS negatief. Dan volgt de "dynastart": K2 via *C*1 even aan de min-pool, OUT wordt positief, DIS spert. *C*2 wordt via *R*4 en de fototransistor al naar gelang de lichtsterkte langzaam of snel geladen. Door de toenemende spanning wordt T1 geopend, maar de hoogohmige ingang van deze transistor belast de spanning aan *C*2 niet (de stuurstroom is te verwaarlozen). De toenemende lichtsterkte van LED1 geeft aan dat de stijgende spanning van *C*2 ervoor zorgt dat T1 meer en meer gaat geleiden. De spanning aan *C*2 bereikt 2/3 van de batterijspanning, OUT wordt negatief, DIS eveneens, de schakeling kipt naar de rusttoestand.

212 Een lichtsturing die niet alleen maar leuk is, zie je in figuur 300. En omdat we nu echte experts zijn geworden, hebben we dat ook onmiddellijk in de gaten. Dat moet een generator zijn, en de fototransistor bepaalt de snelheid waarmee *C*1 wordt opgeladen. Gebruik om te beginnen 6,8 nF en zet de schakeling in een donkere kamer of een kast. Je kunt er het beste een kast voor gebruiken waar niet iedereen stiekum in zou mogen snuffelen. Doet iemand dat toch, dan moet je maar eens horen met wat voor oorverdovend lawaai het alarm afgaat! Hoe meer licht, des te hoger de toon. Een schakeling dus die ook kan worden gebruikt in de koelkast of wanneer je weer geesten gaat bezweren. Hoe dat in zijn werk gaat, hoeven we niet meer uit te leggen. Maar we kunnen



Figuur 300. Voor vrolijke en serieuze toepassingen: de "lichtvogel". Te gebruiken als alarm in een kast, als lux-meter of als lichtgestuurd knipperlicht.

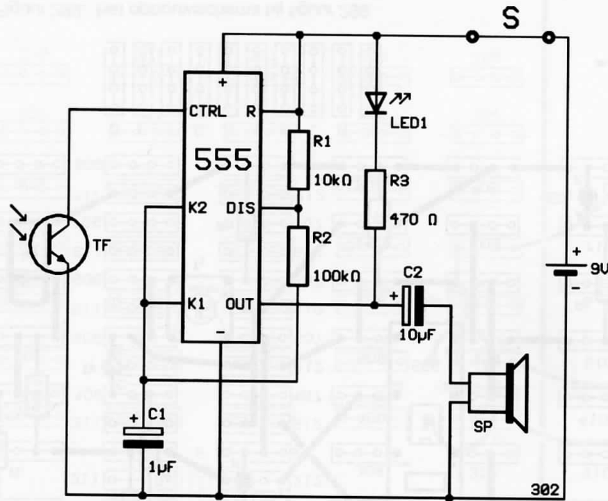
Figuur 301. Het opbouwschema bij figuur 300.

deze lichtafhankelijke "toongever" ook gebruiken voor een heleboel serieuze toepassingen. Bijvoorbeeld als *akoestische lux-meter*. Aan de toonhoogte kun je iedere verandering horen: van een krakend geluid tot een scherp ratelen - weinig licht, hoge fluittoon - zeer helder. Alleen binnen dit bereik heeft het zin om *C*1 te vergroten.

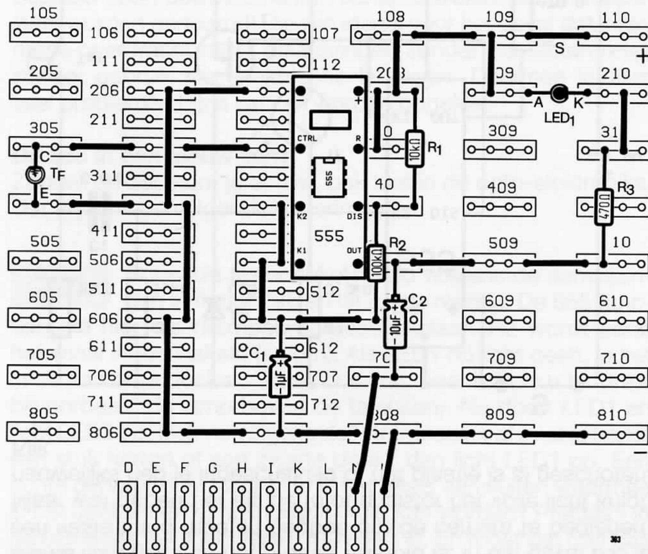
Gebruik nu voor *C*1 maar eens 10 µF. Wat in de luidspreker door min of meer snel kraken wordt aangegeven, komt duidelijker over door het knipperen van LED1. Je zou er de verlichting in een kamer mee kunnen bewaken: regelmatig knipperen betekent dat alles in orde is, een lange lichttijd met kort interval geeft aan dat het licht gedeeltelijk is uitgevallen (bijv. omdat in een kroonluchter een paar gloeilampen kapot zijn), en continu licht staat voor de totale blackout. Het mooie daarbij is dat de bewaking via LED1 of de luidspreker ook aan het andere uiteinde van een lange leiding functioneert!

213 Deze keer worden de schakeldrempels door het licht gestuurd (figuur 302). Als echte profs met de 555 zien we het onmiddellijk: wordt de fototransistor helder belicht, dan zijn de drempels en dus ook hun onderlinge afstand laag, hetgeen kortere tijden en dus een hogere frequentie betekent. En omgekeerd.

Denk bij je experimenten ook maar eens aan het volgende: is er sprake van een grote helderheid, dan is een weerstand van 3,3 kΩ in serie met de fototransistor zinvol. Interessante varianten krijg je, wanneer je *R*1 vervangt door *R*2 resp. (en) *C*1 door *C*2.



Figuur 302. Bij licht gaat het kraken: een helderheids-indicator, ook om grapjes mee uit te halen.

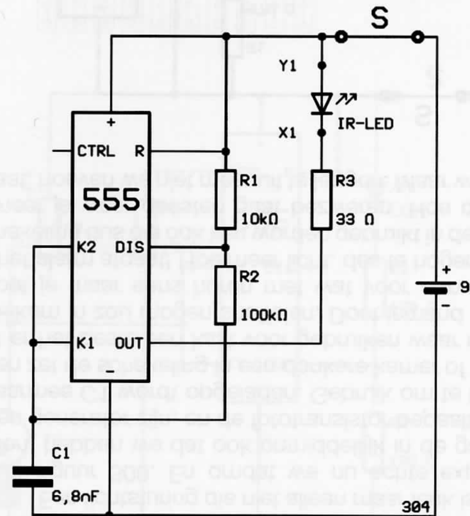


Figuur 303. Het opbouwschema bij figuur 302.

De 555 als actieve kant van de balans

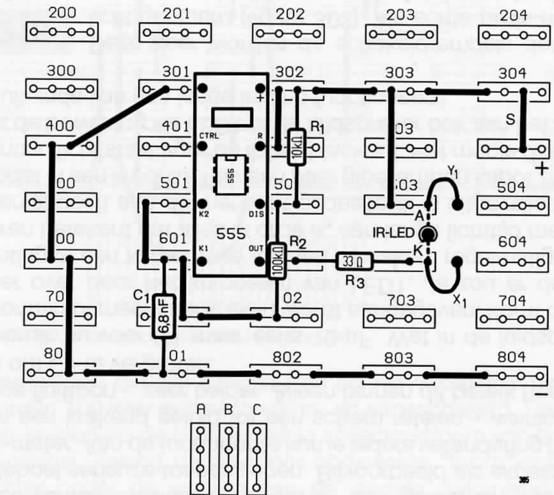
Opto-elektronische proeven worden pas echt leuk, wanneer je ermee kunt doen wat je wilt. We staan er al helemaal niet meer bij stil dat we met onze eigen elektronica in huis er allang aan gewend zijn, met afstandsbedieningen om te gaan. Tot nu toe was dat eigenlijk pas interessant, wanneer er een "verse" batterij in moest. Nu vallen we ook hier met onze neus midden in de boter.

214 Wanneer je niet alleen maar gewoon een zaklamp - of op zijn minst een IR-LED - aan en uit wilt schakelen, moet je de infrarood-zender van figuur 304 maar eens opbouwen. Maar denk er aan - je kunt die zender heus niet zonder meer horen of zien. En hij vréét stroom. Voor experimenten met de zender kun je dus het beste de KOSMOS-nettransformator gebruiken. Wil je de zender draagbaar maken en gebruik je dus toch een batterij, sluit deze dan via een schakelaar aan op de schakeling.

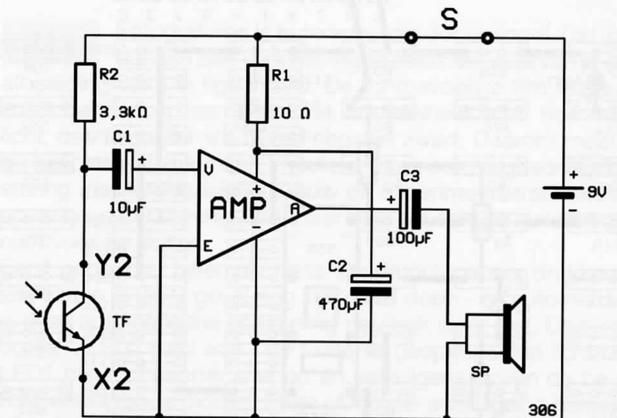


Figuur 304. Zorgt voor infrarood-zendpulsen: de infrarood-zender met geluidsfrequentie.

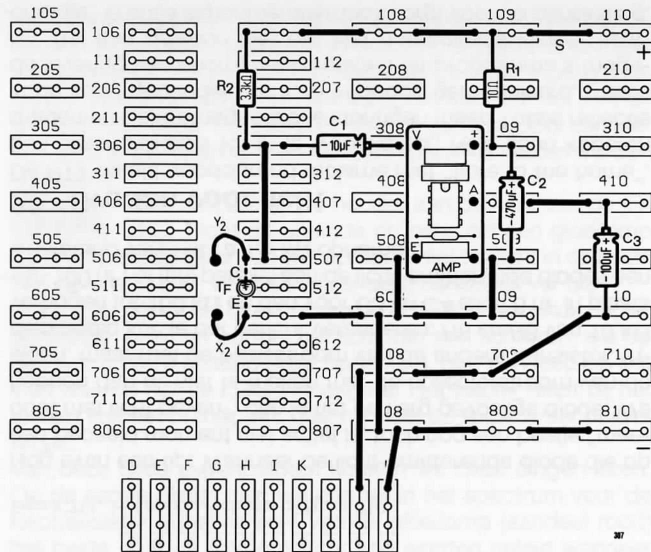
215 Het bewijs dat de zender van figuur 304 actief is wordt geleverd door de volgende schakeling (zie figuur 306). Bevindt de zender met zijn IR-LED zich in de buurt van de fototransistor, dan kun je de toon van zo'n 1 kHz goed horen; dat geldt ook voor toonfrequente signalen van andere infrarood-zenders die voor afstandsbedieningen worden gebruikt (bijv. die van radio's en televisies). De reikwijdte ervan wordt niet alleen beperkt door het vermogen van de zender, maar ook het licht van sterke gloeilampen blijkt hierbij een echte "stoorzender" te zijn. Daardoor gaat onze infrarood-zender brommen. Zonlicht zorgt voor verzadiging van de fototransistor; hij vertikt het dan gewoon. Binnen bepaalde grenzen kun je deze effecten door middel van speciale schakelingen ongedaan maken.



Figuur 305. Het opbouwschema bij figuur 304.



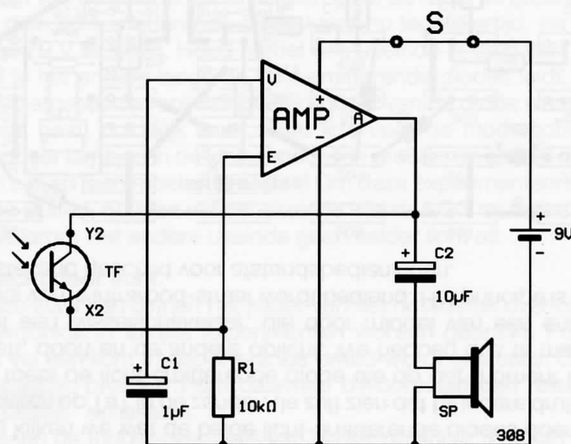
Figuur 306. Een oor voor licht dat de modulatie van infrarood-zenders hoorbaar maakt.



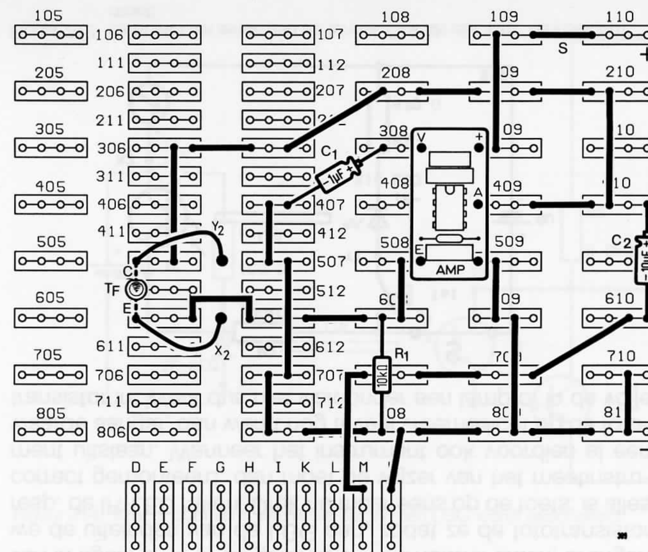
Figuur 307. Het opbouwschema bij figuur 306.

Een AMP met infrarood-cel

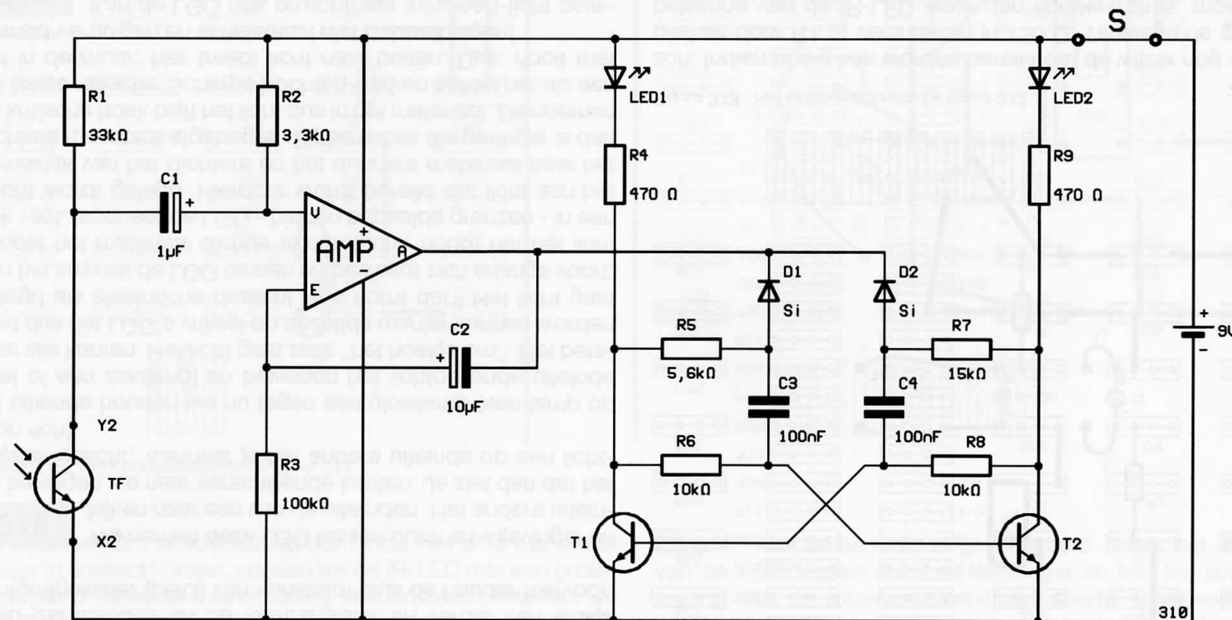
Bij de volgende koppeling tussen de IR-LED en de fototransistor gaat het om iets heel anders.



Figuur 308. Een onzichtbare balk (cel) zorgt voor alarm, wanneer de infraroodstraal wordt onderbroken; met 680 kΩ parallel op de fototransistor geschakeld lukt dat ook in het donker.



Figuur 309. Het opbouwschema bij figuur 308.



Figuur 310. Een goed principe voor afstandsbediening: Aan en uit via een infrarood-straal.

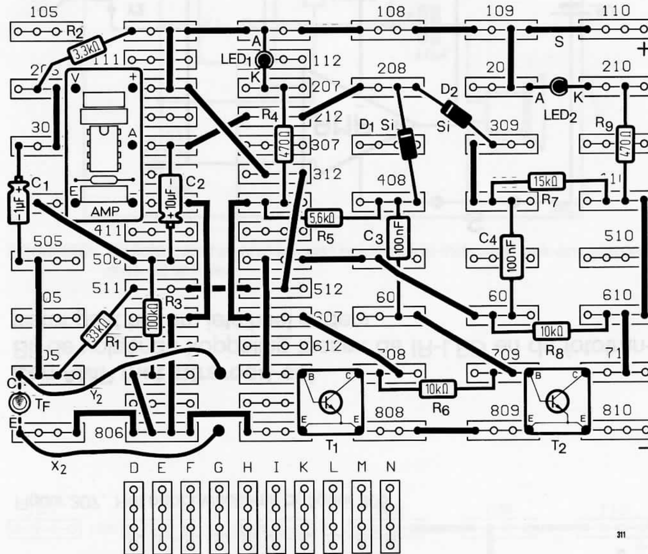
216 De schakeling zoals aangegeven in figuur 308 moet je alleen op de batterij aansluiten wanneer aan de volgende voorwaarde is voldaan: de fototransistor wordt door onze eenvoudige continu-infrarood lichtbron (150 Ω voorschakelweerstand, bedrijf via voedingsapparaat) voortdurend voldoende belicht. Dat kunnen we niet zien, maar wel horen, en wel wanneer de straal wordt onderbroken! Schuif dus maar eens voor heel even het al bekende stukje karton ertussen. De herrie is dan namelijk bijna niet meer om aan te horen.

Aan en uit met infrarood

Als infrarood-zender voor het volgende experiment kunnen verschillende varianten worden gebruikt; ofwel de 555 als generator of gewoon gelijkstroom via een voorschakelweerstand van 150 Ω voor de IR-LED (zie figuur 288).

217 Aan de ontvanger-kant bouwen we in onze proef de schakeling op die je in figuur 310 ziet. De schakeling bestaat uit twee oude bekenden: de AMP als monoflopschakeling (zie hoofdstuk 17) en een dynamische flip-flop zoals we die al in onze reeks experimenten met transistors hebben gebruikt. Dynamisch wordt ook de AMP-monoflop gestuurd, echter deze keer door het licht. Een korte flits die die fototransistor moet raken, is al voldoende. Krachtige lichtbronnen van buitenaf moeten daarbij wel worden vermeden. Laten we de zaak maar als een puur experiment zien, waarbij we

geen grote afstanden willen overbruggen. De IR-LED van de zender en de fototransistor van de ontvanger moeten dicht in elkaars buurt staan. Na het inschakelen van de ontvanger-batterij kijken we wat de beide licht-emitterende diodes doen en drukken op Ta1 in de zender. Je zult zien dat bij iedere druk op de toets de licht-emitterende diode die op dat moment licht geeft, dooft en de andere oplicht. We hebben dus te maken met een wisselschakelaar, die door middel van één enkele toets via de infrarood-straal wordt bediend. Het principe is dus uitstekend geschikt voor afstandsbedieningen.



Figuur 311. Het opbouwschema bij figuur 310.

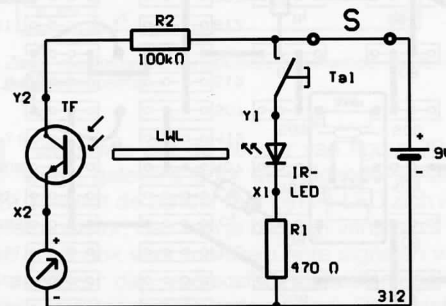
Nog even een tip: Wanneer de licht-emitterende diode die op een bepaald moment niet actief is, toch nog een beetje "meedoet met licht geven", dan is het een erg gevoelige diode. We hebben dan nl. niet te maken met de collectorstroom van de eigen, maar met de basisstroom van de andere transistor. Indien nodig kun je dat gericht veranderen: *R*6 en *R*8 van 10 kΩ verhogen tot 100 kΩ en dan voor *C*3 en *C*4 elk 6,8 nF in plaats van 100 nF, of (en) parallel aan de licht-emitterende diodes een weerstand van 1 kΩ à 1,5 kΩ opnemen.

22. Draden voor licht

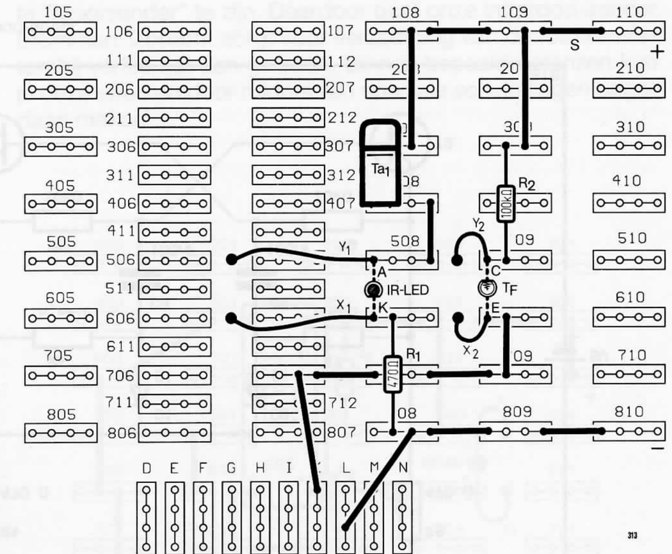
De PTT maakt voortdurend reclame met "fibre to the home". Een glasvezelkabel tot in je woonkamer. Niks geen koperen draden en elektromagnetische storingen meer. Totale reflectie in de vezel gebundeld licht, in infrarood gemoduleerd, maakt de levering van enorm veel diensten en programma's mogelijk, het kan gewoon niet op. Het onopvallend kleine "lichtdraadje" in onze experimenteerdoos zorgt voor de aansluiting, en we kunnen zelf uittesten hoe dat in zijn werk gaat. De beide panelen bevatten de nodige onderdelen: houders voor (infrarood-)zenddiodes en de fototransistor en verder een stukje lichtgolfgeleider (LGG) van kunststof plus de houder hiervoor.

218 We nemen deze LGG tussen duim en wijsvinger en kijken naar een van de uiteinden. Het andere uiteinde bewegen we naar verschillende kanten. Je ziet dan dat het snijvlak oplicht, wanneer je het andere uiteinde op een lichtbron richt.
Dit uiteinde houden we nu tegen een gloeilamp (een lamp op tafel of een zaklamp) en bewegen het lichtgevende uiteinde naar alle kanten. Het licht gaat zelfs "het hoekje om". Het betekent dus dat LGG's vrijwel op dezelfde manier kunnen worden gelegd als elektrische draden! Hoe komt dat? Het licht gaat aan het snijvlak de LGG binnen en beweegt zich erlangs voort. Omdat het materiaal dichter is dan lucht, houdt het het licht ook vast, wanneer de LGG - binnen bepaalde grenzen - in een bocht wordt gelegd. Hierdoor wordt bereikt dat licht aan het grensvlak van het dichtere en het dunnere materiaal naar het dichtere toe wordt afgebogen. Bij een hoek die geringer is dan de kritische hoek blijft het licht dus in het materiaal. Dit noemen we totale reflectie. Scherpe bochten werken echter net als een gat in de muur; hier treedt licht naar buiten. Dus: nooit met geweld verbuigen en al helemaal niet dubbelbuigen!

219 Kan de LGG ook onzichtbaar infrarood-licht geleiden? Steek de IR-LED en de fototransistor fototransistor maars eens naast elkaar in de houder en monteer deze samen met de houder voor de LGG aan de zijkant in de paneelbehuizing. Bouw nu de schakeling op zoals aangegeven in figuur 312. In de gaten die in de houder zitten, brengen we de uiteinden van de LGG aan, zodat ze de fototransistor resp. de IR-LED raken. Druk nu maar eens op de toets: is alles correct gemonteerd, dan moet de wijzer van het meetinstrument uitslaan. Wanneer het instrument ook voordien al een waarde aangaf, dan werkt nog teveel vreemd licht op de fototransistor in. Werk dus niet vlak onder een lamp of in de volle zon. Indien nodig kan worden bereikt dat de wijzer nog verder uitslaat door *R*1 te veranderen in 150 Ω; vanwege de grotere belasting van de IR-LED waar dan sprake van is, moet Ta1 maar heel even ingedrukt worden. Deze proef toont aan dat de LGG ook infrarood-licht kan geleiden. En ook dit licht kan, als dat gewenst wordt, weer "de hoek om" gaan.



Figuur 312. Licht aan het einde van de tunnel. Ook als dat licht "de hoek om" moet!



Figuur 313. Het opbouwschema bij figuur 312.

220 We nemen het zekere voor het onzekere en halen de LGG uit de houder bij de fototransistor weg. Wanneer je nu op Ta1 drukt, mag er niets gebeuren. Maar wanneer je, terwijl je de toets ingedrukt houdt, het uiteinde van de LGG weer aan de kant van de IR-LED aanbrengt, dan moet de wijzer van het meetinstrument uitslaan.

De gulden snede

Wedden dat je uit de LGG nog meer kunt halen dan je daarnet hebt gemeten?

221 Snijd met een scheermes of een scherp hobbymes (alleen voor volwassenen!) de beide uiteinden van de LGG mooi glad en in een rechte hoek af. Steek nu de beide uiteinden weer in de houder en voer de meting opnieuw uit. Je zult zien dat de wijzer nu helemaal uitslaat, zelfs nog bij 470 Ω voor *R*1.

222 Wanneer we de fototransistor met behulp van een draadbrug overbruggen, zien we dat de wijzer nauwelijks nog verder uitslaat. Bij de stroom van het meetinstrument wordt de transistor dus al volledig doorgeschakeld. Conclusie: de overgangspunten tussen licht en elektronica zijn beslissend voor het rendement, d.w.z. voor de verhouding tussen het overgedragen en het opgenomen vermogen. Treedt

het licht immers een glad oppervlak binnen, dan worden de stralen netjes samengehouden. Maar zijn de afgesneden vlakken schuin en niet gelijkmatig, dan wordt aan de ingang minder licht opgenomen en worden de invalshoek van het licht en de hoek waaronder het uittreedt, minder gunstig. Door de vlakken glad te polijsten kunnen de resultaten dus verder worden verbeterd.

223 Trek de LGG uit de houder aan de kant van de IR-LED. Richt dit uiteinde nu eens op een gloeilamp (tafellamp o.i.d.) Maar pas wel op dat je niet te dicht in de buurt van de lamp komt, want de wijzer slaat behoorlijk ver uit.

224 Steek het uiteinde van de LGG door een stuk papier heen en bundel het licht van een lichtbron, die op een wat grotere afstand staat opgesteld, met een loep op het vlak waarop het de LGG binnengaat. Het papier helpt bij het vinden van het brandpunt. Ook nu slaat de wijzer weer duidelijk uit.

Van deze twee experimenten kunnen we twee dingen leren. Op de eerste plaats zien we dat het in het spectrum voor de fototransistor gunstige licht van de gloeilamp (aandeel rood) het beste naar de fototransistor kan worden geleid wanneer het afsnijvlak van de LGG precies op de lamp is gericht. En daarnaast merken we dat wanneer licht met behulp van een loep op het ingangsvlak wordt gebundeld, de lucht en de LGG ieder deel uitmaken van de complete weg waarlangs het licht wordt getransporteerd. Overigens zijn de behuizingen van de "bouw"-elementen die we voor het licht gebruiken, eveneens lensvormig. Daardoor nemen ze bij voorkeur licht op dat er precies verticaal opvalt resp. zenden dit licht zodanig uit.

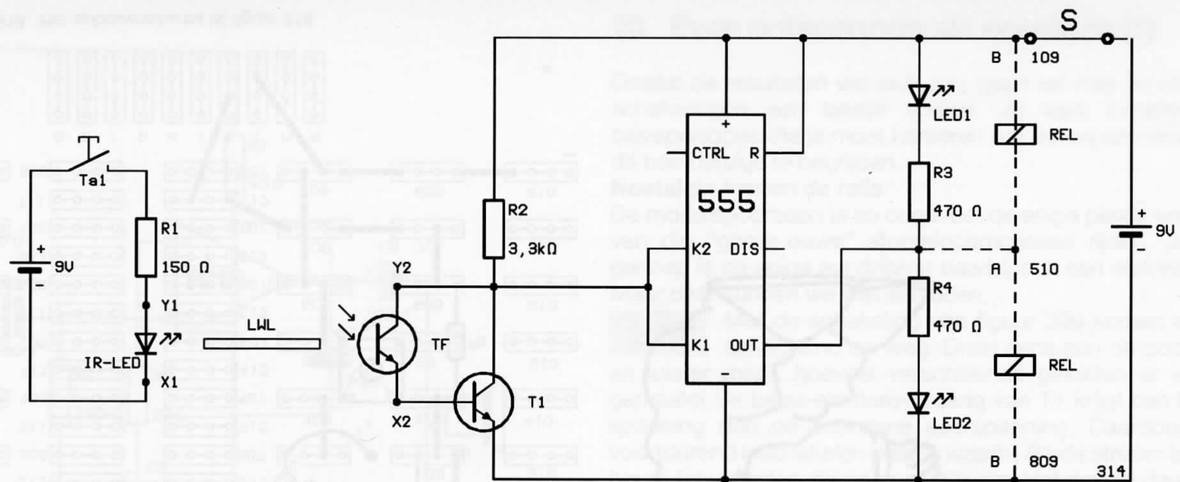
225 Voordat we met de volgende leuke experimenten gaan beginnen, kijken we nog eens even naar het effect van de gladde oppervlakken: over de rode, de groene en de gele licht-emitterende diode komt nu tegelijkertijd, via 470 Ω elk, 9 V te staan. Houd nu het ene uiteinde in de gaten, terwijl je het andere langs de licht-emitterende diodes leidt. Het goed afgesneden snijvlak geeft de kleur van de diode waar het langs gaat, duidelijk weer. Echt iets voor de modelbouwer, wanneer lampjes in de kleine modellen precies op schaal moeten zijn en toch moeten branden! Om deze experimentenreeks af te sluiten, houden we het uiteinde van de LGG nu tegen een gloeilamp. Het andere uiteinde geeft helder licht af!

Kracht door licht

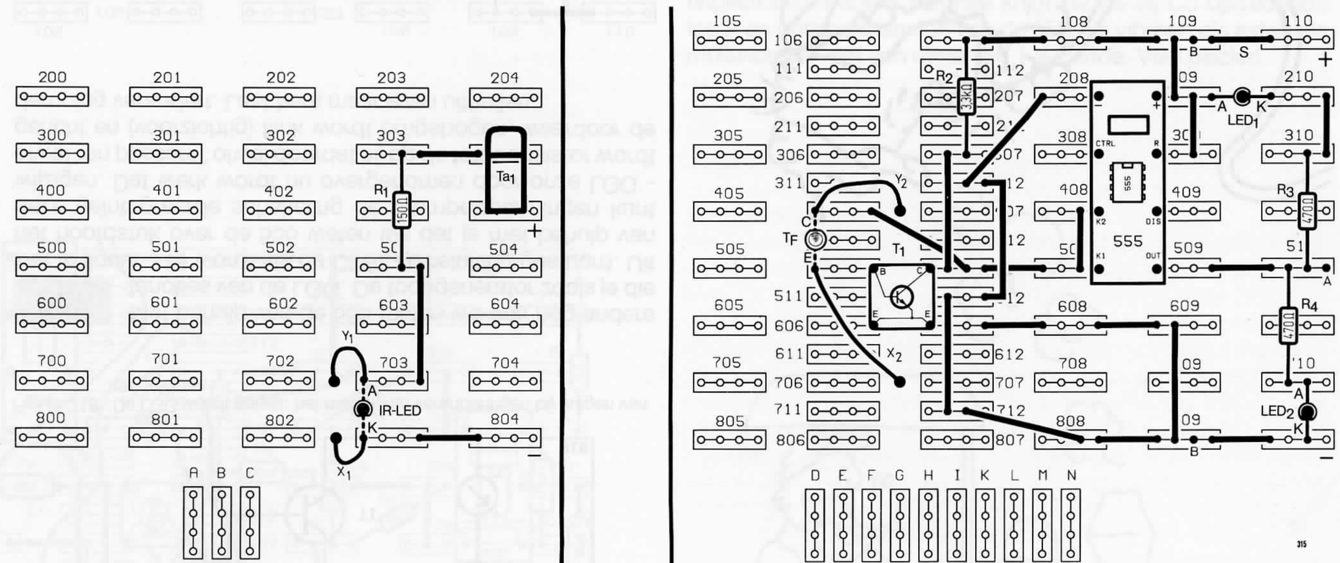
Onze LGG kan binnen het kader van het hoofdstuk over opto-elektronica in talrijke experimenten worden gebruikt. Power die via een licht transporterende draad wordt gestuurd. Geen

226 probleem om daarmee bijvoorbeeld een relais te schakelen.

Tussen de trigger-drempels van de 555 in figuur 314 kan met behulp van het stukje LGG heen en weer worden geschakeld. Hiervoor moet je het uiteinde ervan in de buurt van de fototransistor brengen ofwel het uit de buurt van de fototransistor

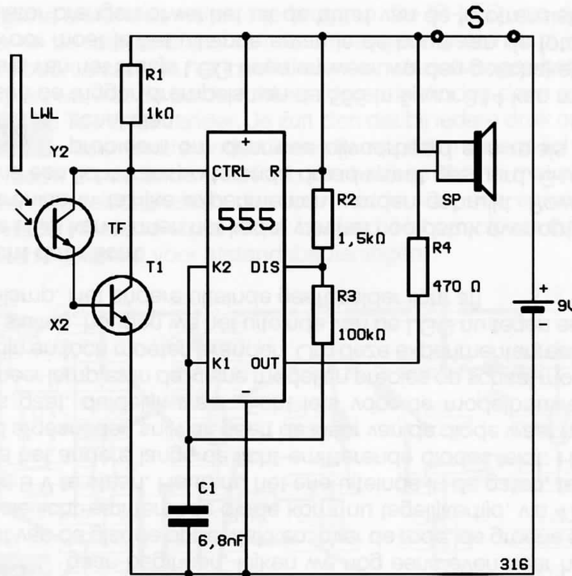


Figuur 314. Kracht door licht: een relais dat via een LGG wordt geschakeld.

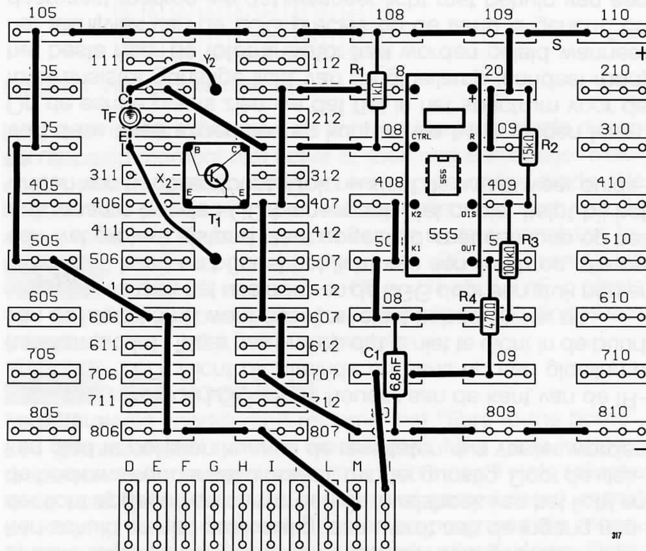


Figuur 315. Het opbouwschema bij figuur 314.

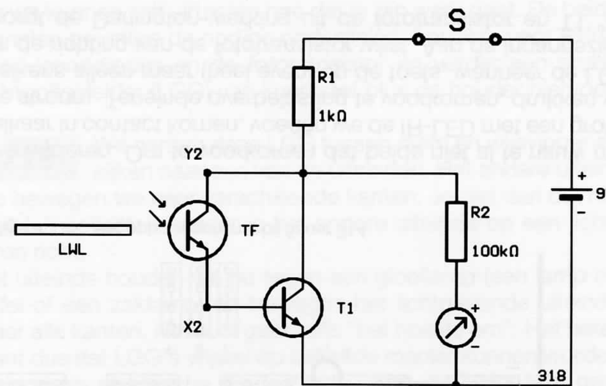
verwijderen. Om te voorkomen dat beide niet al te nauw met elkaar in contact komen, voeden we de IR-LED met een grotere stroom. Teneinde overbelasting te voorkomen, drukken we telkens alleen maar (heel even) op de toets, wanneer de LGG in de richting van de fototransistor wijst. Aan de ingangszijde zorgt de Darlington-werking uit de fototransistor en T1 "op afstand" voor de benodigde gevoeligheid. Neem het uiteinde van de LGG tussen duim en wijsvinger en leid het langs de ingang van de fototransistor; houd daarbij tegelijkertijd de toets ingedrukt. Let maar eens op de reactie. Je kunt ook een KOSMOS-nettransformator X naar keuze tussen OUT (510) en plus (109) dan wel min (809) aansluiten.



Figuur 316. Dit nemen we nog even mee: de hoogte van een toon wordt gestuurd door een LGG.

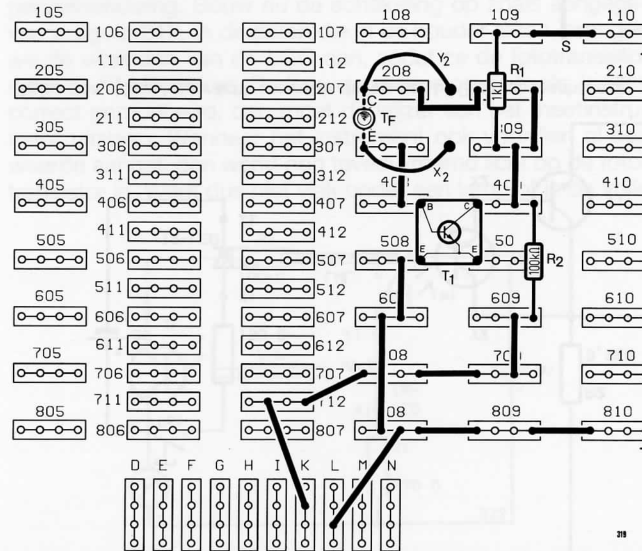


Figuur 317. Het opbouwschema bij figuur 316.



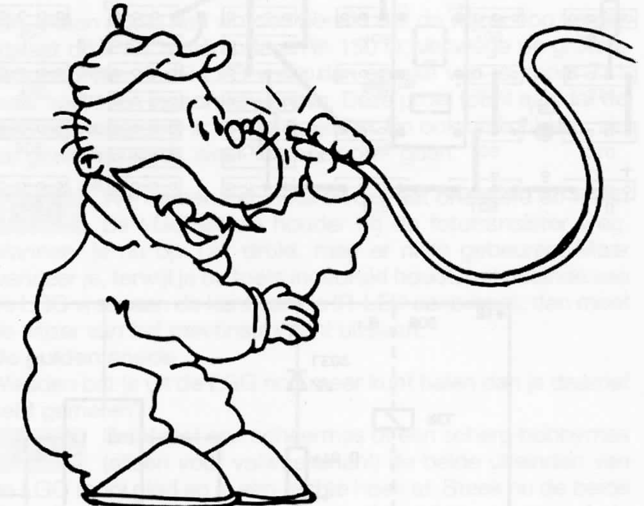
Figuur 318. De LGG wordt getest: het meten van veranderingen bij buigen van de geleider.

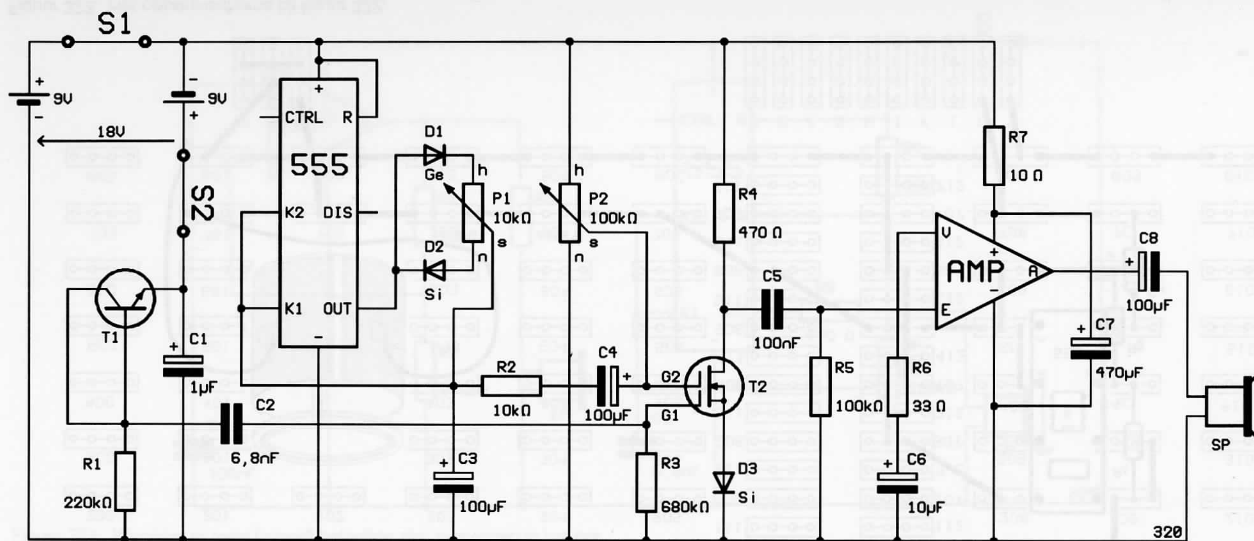
227 Met behulp van de 555 testen we ook nog andere functies van de LGG. De toongenerator zoals je die ziet in figuur 316 wordt via de CTRL-aansluiting gestuurd. Uit het hoofdstuk over de 555 weten we dat je met behulp van deze geïntegreerde schakeling de drempelspanningen kunt wijzigen. Dat werk wordt nu overgenomen door onze LGG - ofwel "en passant" ofwel doordat hij op de fototransistor wordt gericht en (voorzichtig) flink wordt omgebogen, waardoor de demping verandert. Laat hem maar even uithuilen...



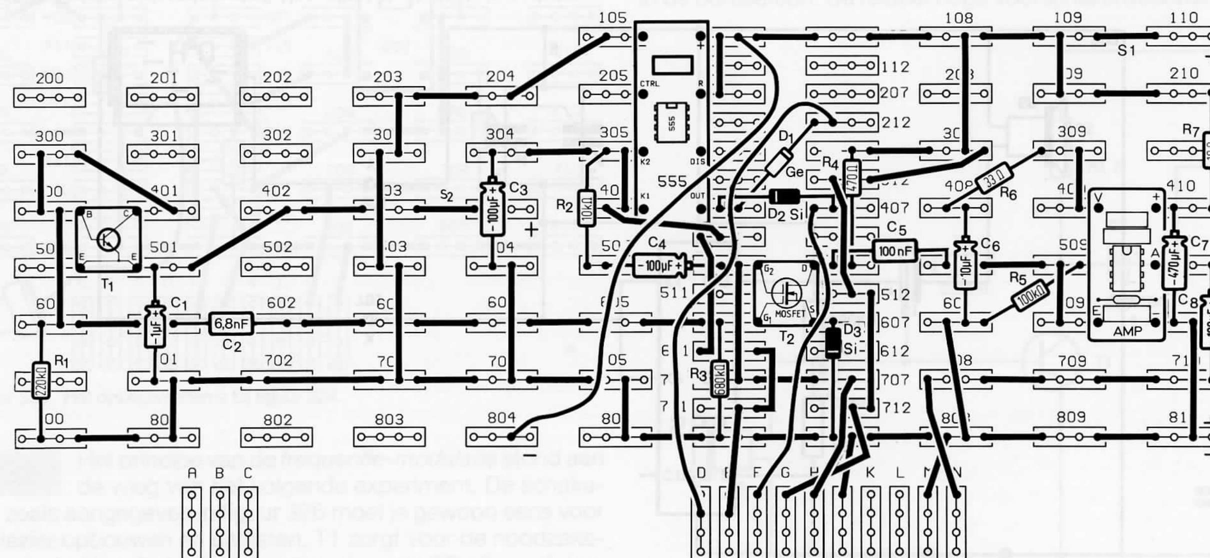
Figuur 319. Het opbouwschema bij figuur 318.

228 Aan de hand van het experiment dat bij figuur 318 hoort, kun je de bewegingsspelletjes met de LGG "objectiveren". Het meetinstrument maakt iedere verandering zichtbaar. Op die manier kun je beter voorspellen wat er kan gebeuren. Bij al deze tests moet je licht van buitenaf vermijden; dat stoort immers alleen maar en beïnvloedt het resultaat in negatieve zin.





Figuur 320. De 555 stoomt op: geluid als van een echte stoomloc.



Figuur 321. Het opbouwschema bij figuur 320.

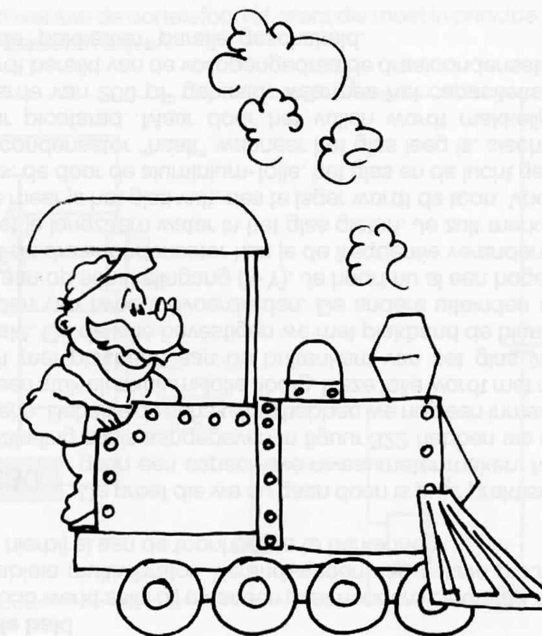
23. Even ontspannen: de speeltuin (1)

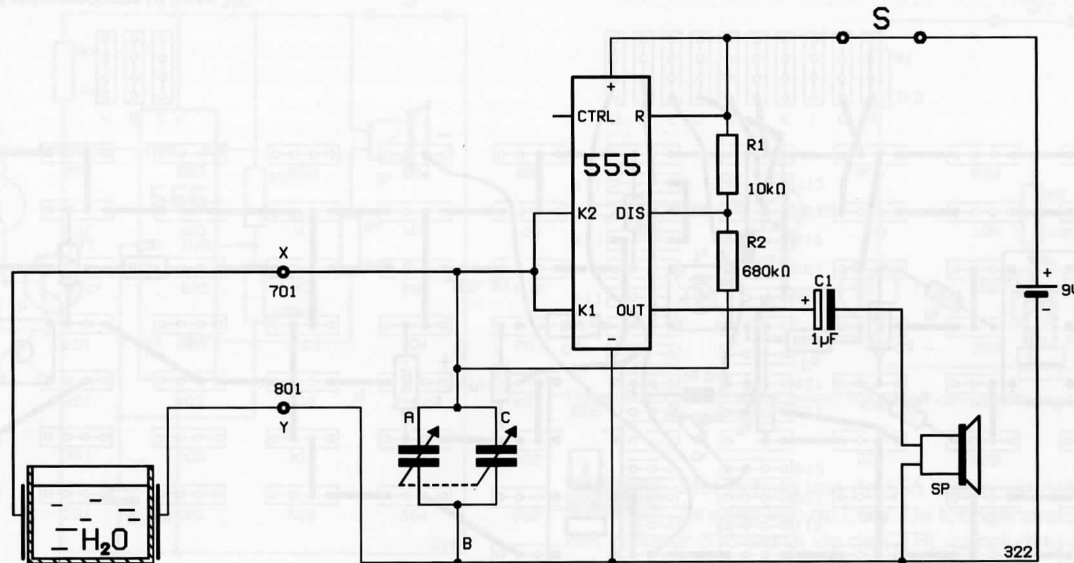
Omdat de resultaten wel leuk zijn, gaan we met de volgende schakelingen een beetje spelen. Je kent inmiddels de basisprincipes die je moet hanteren om de experimenten van dit hoofdstukje te begrijpen.

Nostalgie tussen de rails

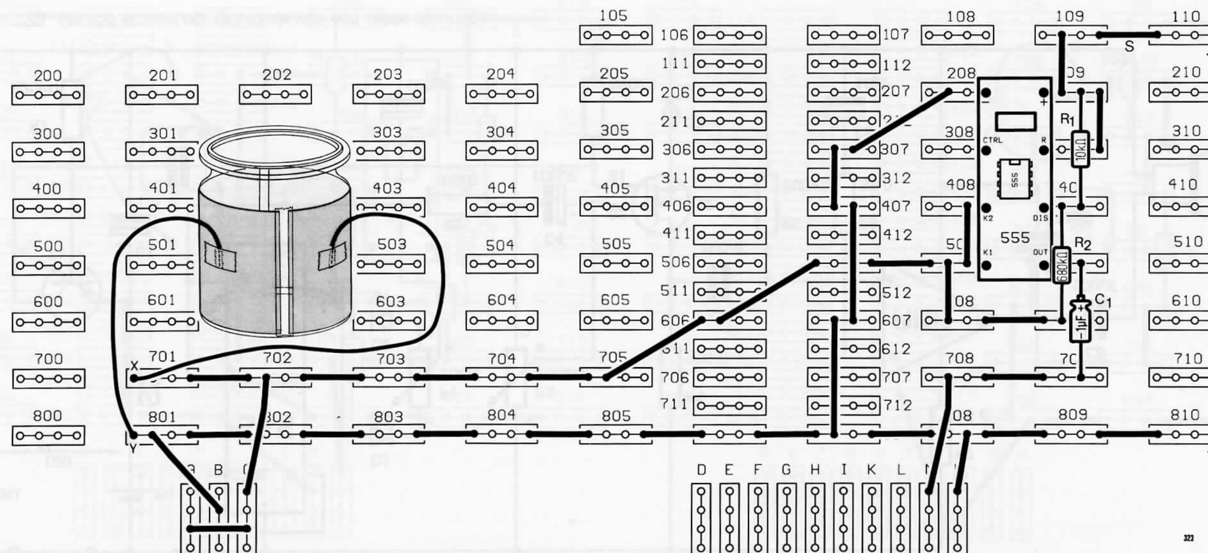
De modelspoorbaan is zo ongeveer de enige plaats waar nog van die "goeie ouwe" stoomlocomotieven rijden. Jammer genoeg is de enige aandrijving daarbij ook een elektromotor. Maar daar kunnen we wat aan doen.

229 Met de schakeling van figuur 320 komen we een aardig eind op weg. Draai eens aan de potmeters en luister maar, hoeveel verschillende geluiden er worden gemaakt! De basis-emitterovergang van T1 krijgt een hogere spanning dan de voorziene sperspanning. Daardoor vindt voortdurend inschakelen plaats, waarbij *R*1 de stroom beperkt houdt tot waarden die ongevaarlijk zijn. Het gevolg daarvan is het ruisen dat je hoort. De bij deze ruis behorende spanning wordt door T2 via G1 naar de AMP geleid en via SP als geluid uitgestraald. Parallel hiermee krijgt G2 de bij *C*3 optredende laad- en ontlaadspanning van de 555. Hij vibreert als astabiele multivibrator met een ritme van 1 seconde. Veel plezier!





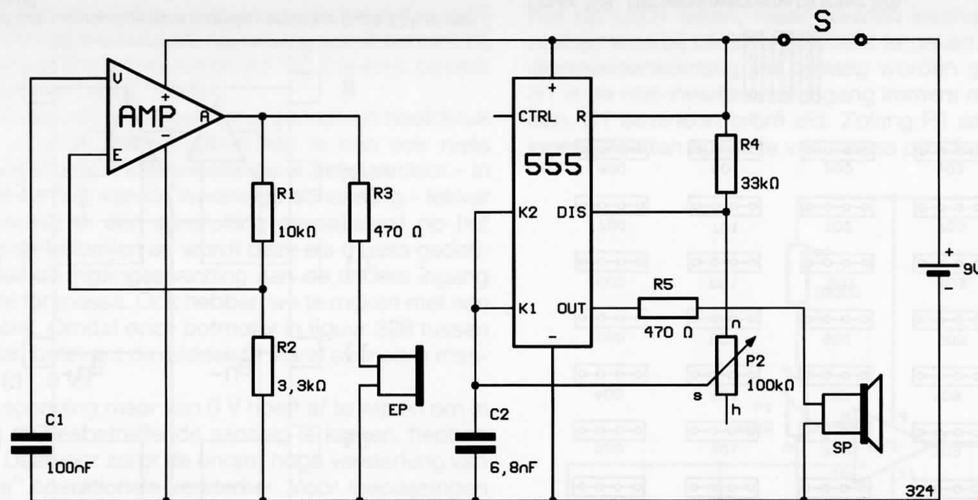
Figuur 322. Ook "muziek onder water". Hoe voller het vat, des te lager de toon.


Figuur 323. Het opbouwschema bij figuur 322.

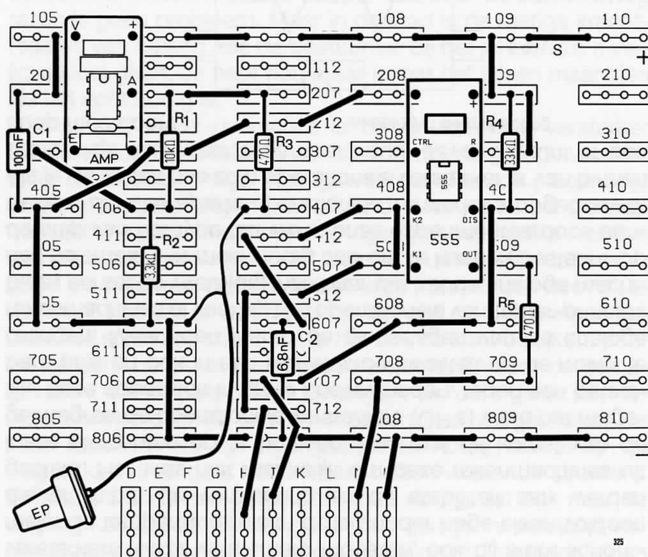
Volle bak!
De 555 werkt zelfs bij maar een paar honderd picofarad nog als astabiele multivibrator. Veranderingen van enkele picofarads zijn hierbij al aan de toonhoogte te herkennen.

230 De proef die we nu gaan doen is puur praktisch: we gaan een capacitieve niveaumeter maken. Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 322 hebben we weinig moeite. Behalve de schakeling hebben we nog een inmaakglas en een stuk aluminium-folie nodig. Deze folie wordt met de ene helft met plakband aan de buitenkant van het glas vastgemaakt. Op de folie bevestigen we met plakband de blanke uiteinden van twee toevoerdraden. De andere uiteinden sluiten we aan op schakelingang (X-Y). Je hoort nu al een hoge toon. Met de draaicondensator kun je de frequentie veranderen. Nu moet je langzaam water in het glas gieten. Je zult merken dat hoe meer je het glas vult, des te lager wordt de toon. Voor insiders: de door de aluminium-folie, het glas en de lucht gevormde condensator "haalt" wanneer het glas leeg is, slechts een paar picofarad. Maar door het vullen wordt makkelijk een waarde van 200 pF gehaald, waarmee het capaciteitsbereik wordt bereikt van de vol opengedraaide draaicondensator met beide "pakketten" parallel geschakeld.

231 Ook de schakeling zoals aangegeven in figuur 324 is iets om mee te gaan spelen. Je moet hiervoor na het inschakelen de potmeter langzaam tussen maximum op minimum heen en weer draaien. Beide akoestische omzetters produceren een pieptoon. Maar luister nog eens heel goed! Bij het doordraaien is er een heel klein bereik waarin de frequentie van de 555-generator dicht in de buurt komt van die van de AMP-generator. Net alsof je je vingers in je oren steekt en ze van tijd tot tijd even eruit haalt. Dit effect noemen we *zweving*. En omdat we met vrijwel dezelfde frequentie te maken hebben, worden de geluidsgolven van beide bronnen in de buurt van ons oor sterker of zwakker. Hoe minder de batterij is gebruikt, des te zachter het geluid. Je kunt ook de 470 µF-condensator parallel aan de batterij aansluiten op plus en min. En zo wordt het bewijs geleverd: zonder deze elco en met 10 Ω in de plusleiding tussen de batterij en de schakeling (bijv. in plaats van brug S) krijg je een behoorlijk harde "bel" te horen en nog wat andere rare geluidseffecten. Beide generatoren zijn nu nl. via de kunstmatig verhoogde inwendige weerstand van de batterij gekoppeld en beïnvloeden elkaars omschakelpunten. De ene "sleurt" de andere mee. Draai je verder, dan zal de frequentie op een paar plaatsen ineens veranderen. We noemen dit ook wel *synchronisatie*: de sterkste zegt tegen de zwakste, wanneer die moet omschakelen.

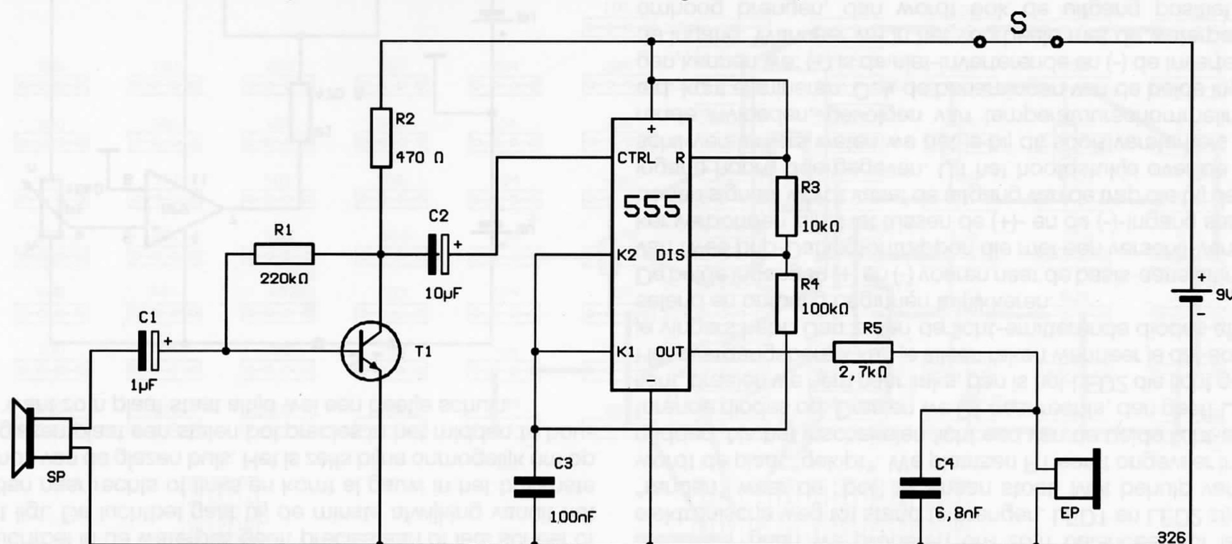


Figuur 324. Wanneer er twee (vrijwel) hetzelfde zijn: zwevingen in het oor.

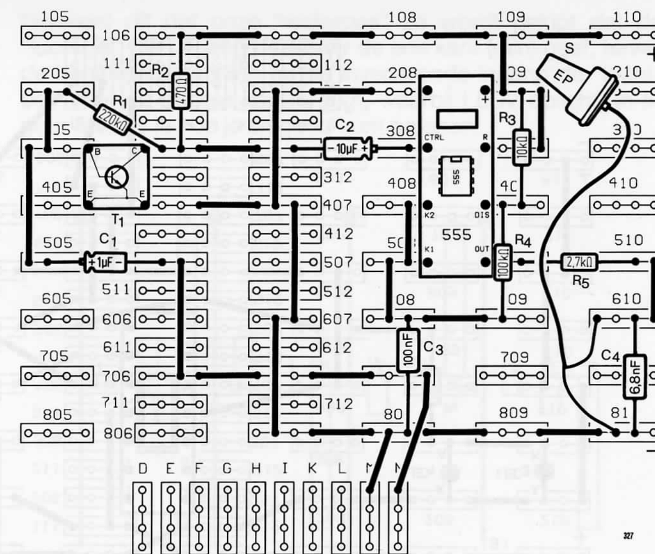


Figuur 325. Het opbouwschema bij figuur 324..

232 Het principe van de *frequentie-modulatie* stond aan de wieg van het volgende experiment. De schakeling zoals aangegeven in figuur 326 moet je gewoon eens voor je plezier opbouwen en uittesten. T1 zorgt voor de noodzakelijke versterking zodat de lage spanning van SP zijn werk kan doen wanneer het geluid inwerkt op de schakeling. Dat werk bestaat uit het verleggen van de comparator-drempels in de 555. In de oortelefoon klinkt het best wel grappig. We hebben enerzijds weer de basis-frequentie van de 555-multivibrator, die binnen het bereik van ons gehoor ligt. Maar bovendien reageert de inductiviteit ervan als frequentie-afhankelijke weerstand ook op de verandering van deze frequentie door de modulatie die in de microfoon wordt bewerkstelligd. Praat of zing maar eens in de SP! Als reactie krijg je een luid jankgeluid in de oortelefoon. De relatief hoge voorschakelweerstand vóór de EP zorgt tenminste nog voor een beetje bescherming van je gehoor. Maar lang is dat gejank niet uit te houden. Als je dus even leuk wilt doen en het milieu met een hoop herrie wilt vervuilen: AMP en luidspreker aansluiten. Maar tak het signaal dan wel aan de oortelefoon af, want die moet in principe steeds aangesloten blijven.



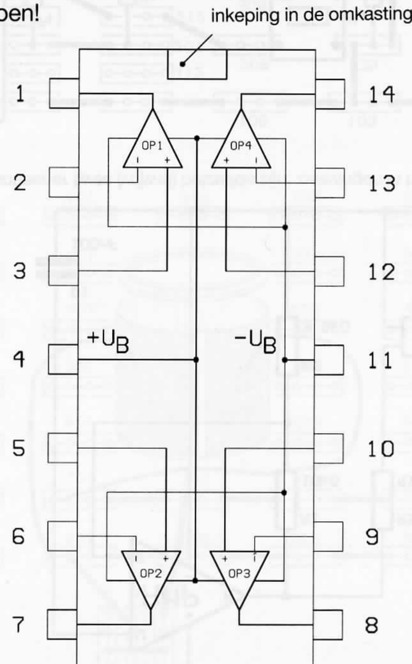
Figuur 326. De stem van de toon: een onconventionele frequentie-modulatie.



Figuur 327. Het opbouwschema bij figuur 327.

24. De operationele versterker, basis voor onze operatie

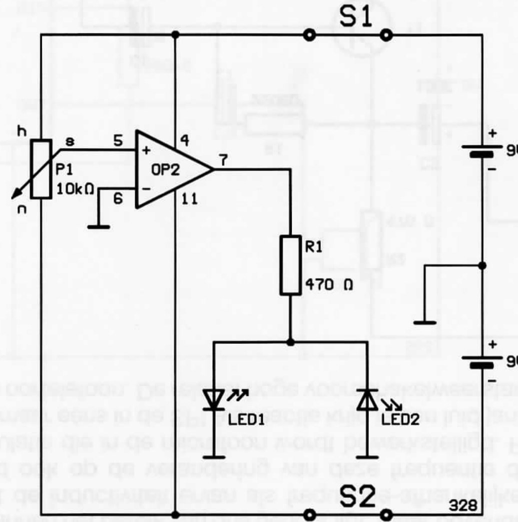
Voordat de snelle *digitale rekenmachine* (of gewoon de computer zoals we die nu kennen) er was, maakte de wetenschap voor het berekenen en nabootsen van processen in de natuur en de techniek gebruik van *analoge rekenmachines*. De rekenkundige bewerkingen die moesten worden uitgevoerd (bijv. optellen, aftrekken enz.), werden gerealiseerd met behulp van versterkers. Deze versterkers moesten, ook bij sterk schommelende temperaturen, aan de bijzonder hoge eisen voldoen die er m.b.t. de versterking en de stabiliteit aan werden gesteld. Het was niet makkelijk om deze rekenmachines uit losse elementen op te bouwen. Pas met de komst van de geïntegreerde *operationele versterkers* (OP's) werd het mogelijk, deze apparaten in grote hoeveelheden, tegen een betaalbare prijs en ook in een uitstekende kwaliteit op de markt te brengen. Maar toen waren de gloriedagen van de analoge rekenmachines al voorbij. Het operationele versterker-principe bleek echter zó veelzijdig inzetbaar dat het de analoge machines helemaal niet meer nodig had om te kunnen bestaan. Op de chip van het type dat we in onze experimenteerdoos aantreffen, zijn vier aparte operationele versterkers opgebouwd. Als je wil weten hoe zo'n operationele versterker er van binnen uitziet, kijk dan maar eens naar figuur 327a. Je kunt er een hoop mee doen!



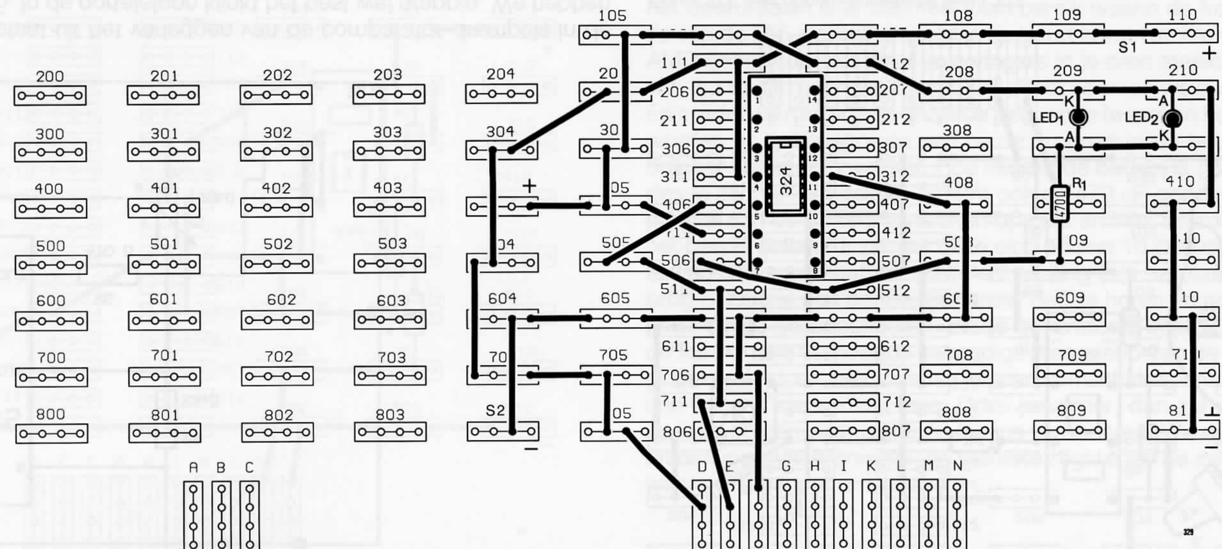
Figuur 327a. Zo ziet den viervoudige operationele versterker (type 324) er van binnen uit.

Voorbeeld: de waterpas

De luchtbel in de waterpas geeft precies aan of iets scheef of recht ligt. De luchtbel gaat bij de minste afwijking vanuit het midden naar rechts of links en komt al gauw in het bovenste uiteinde van de glazen buis. Het is zelfs bijna onmogelijk om op een glazen plaat een stalen bol precies in het midden te houden, want zo'n plaat staat altijd wel een beetje schuin.



Figuur 328. De comparator: balanceer-act tussen twee aanslagen.



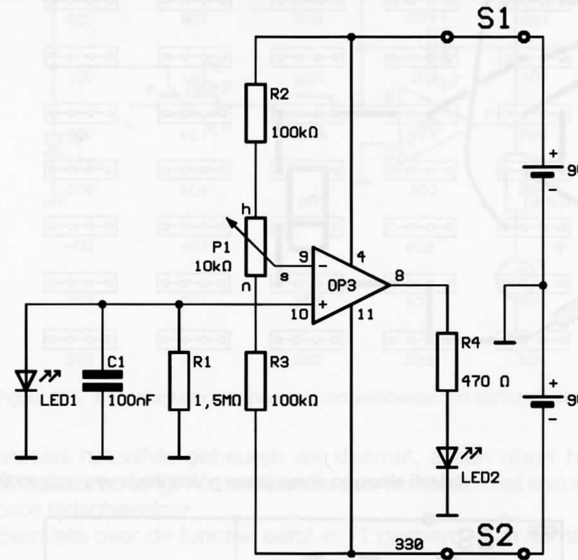
Figuur 329. Het opbouwschema bij figuur 328.

233 In het experiment zoals aangegeven in figuur 328 gaan we proberen om zo'n balanceer-act langs elektronische weg tot stand te brengen. LED1 en LED2 zijn de "randen" waar de "bol" tegenaan stoot. Met behulp van P1 wordt de plaat "gekipt". We plaatsen P1 eerst ongeveer in het midden. Na het inschakelen licht een van de beide licht-emitterende diodes op. Draaien we P1 naar rechts, dan geeft LED1 licht, draaien we hem naar links, dan is het LED2 die licht geeft. Het overgangsbereik kun je alleen raken wanneer je dat echt in je vingers hebt. Dan zullen de licht-emitterende diodes afwisselend en onrustig beginnen te flikkeren.

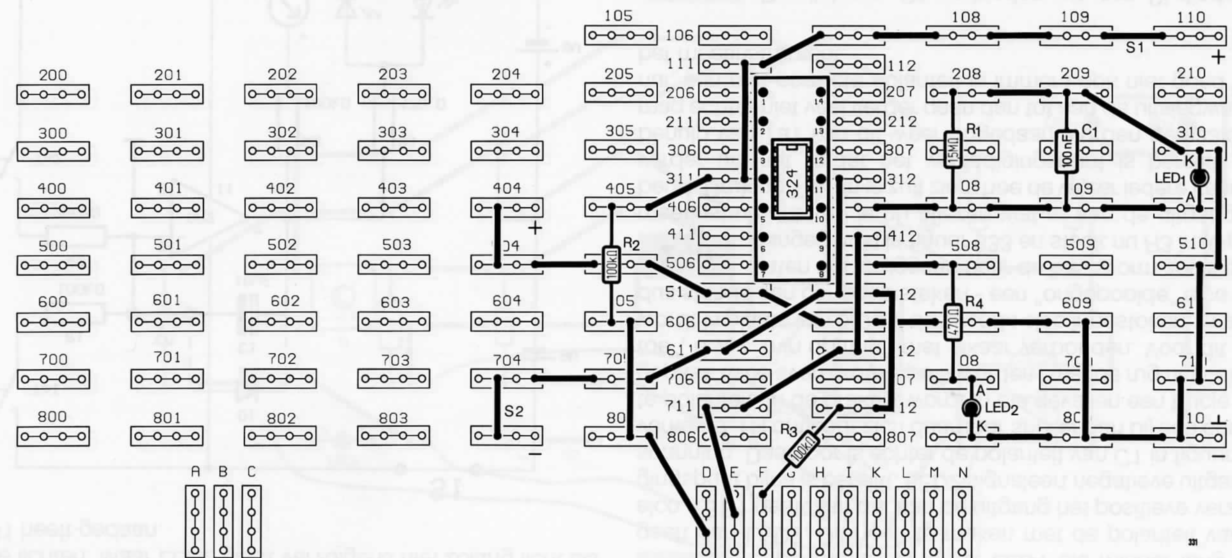
De beide ingangen (+) en (-) voeren naar de basis-aansluitingen van twee pnp-Darlingtontrappen die met een verschil-versterker verbonden zijn. Het tussen de (+)- en de (-)-ingang aangeboden signaal wordt vanaf de uitgang van de trap die bij de (+)-ingang hoort, doorgegeven. Uit het hoofdstukje over de verschil-versterkers weten we dat je bij dit soort versterkers storende invloeden, gevolgen van temperatuurschommelingen e.d. kunt elimineren. Ook de benamingen van de beide ingangen kennen we: (+) is de niet-inverterende en (-) de inverterende ingang. Wanneer we in het voorbeeld met de waterpas (+) omhoog brengen, dan wordt ook de uitgang positief. En wanneer we (-) omhoog brengen, komt aan de uitgang een negatieve spanning te staan. Het omhoog brengen staat voor een positieve spanning. Je kunt het rollen van de bol naar een van de aanslagen vergelijken met de positieve resp. de negatieve verzadingingsspanning van de uitgang van de operatio-

nele versterker. Het inwendige daarvan voorkomt dat daarbij de positieve of de negatieve bedrijfsspanning wordt bereikt. Bij ons soort versterker komen we ongeveer 1,5 V te kort, bij plus iets meer, bij min een beetje minder.
De operationele versterker hebben we al gebruikt in hoofdstuk 19. Spanning uit twee spanningsbronnen is dan ook niets nieuws meer. Voor de verschil-versterker is het daardoor - in combinatie met de rest van de inwendige schakeling - lekker overzichtelijk: wordt er een aansluiting gerealiseerd op het knooppunt van de batterijen en wordt deze als massa gedefinieerd, dan staat de ingangsspanning aan de andere ingang immers in relatie tot massa. Ook hebben we te maken met een spanningsverschil. Omdat onze potmeter in figuur 328 tussen plus en min staat, betekent de middelste stand eveneens massa-"spanning" (d.i. 0 V).
Hoe weinig de spanning maar van 0 V hoeft af te wijken om in de richting van de desbetreffende aanslag te kippen, hebben we net gezien. Daarvoor zorgt de enorm hoge versterking van de "ongeremde" operationele versterker. Voor toepassingen als voor een waterpas is dat prima. Maar in de meeste andere gevallen moet daar iets tegen worden gedaan. Het is net als bij een sterke motor: met 200 km per uur over de autosnelweg razen is geen probleem. Maar in de stad is de rustige krachtreserve van belang, die de bestuurder bij het inhalen zo'n veilig gevoel geeft. Je hebt het, maar je laat het alleen maar zien als het echt nodig is!
Dankzij dit power-overschot is de operationele versterker berekenbaar. De idealen ervan zijn: de oneindig hoge versterking, de oneindig hoge ingangsweerstand en de (nagenoeg) verwaarloosbare uitgangsweerstand. Met een heel geringe hoeveelheid spanning tussen de ingangen belangrijke reacties aan de uitgangen krijgen, dat betekent uiteindelijk dat we zo goed als helemaal niet meer met deze spanningen hoeven te rekenen. Het lijkt er wel haast op dat aan de beide ingangen dezelfde spanning staat. Dat je het ook zo kunt bekijken, daar zal de beginner eerst aan moeten wennen. En voor de grensgevallen, waarbij de details belangrijk worden, geldt: om de bipolaire operationele versterker zoals wij ze hier gebruiken, te laten functioneren, zijn ingangsstromen nodig, ook al zijn ze nog zo klein (hier gaat het om naar buiten vloeiende stromen). Er is dus steeds een gelijkstroompad nodig, dat ook naar de uitgang kan leiden. Bij een op dit pad gelegen weerstand valt dus steeds een (meestal geringe) spanning af. Daardoor leiden kleine verschillen tussen de ingangsstromen ook bij gelijke weerstanden tot een gering spanningsverschil, dat als ingangssignaal werkt. Belangrijk om te weten als het erom gaat of de operationele versterker kan worden ingezet of niet.

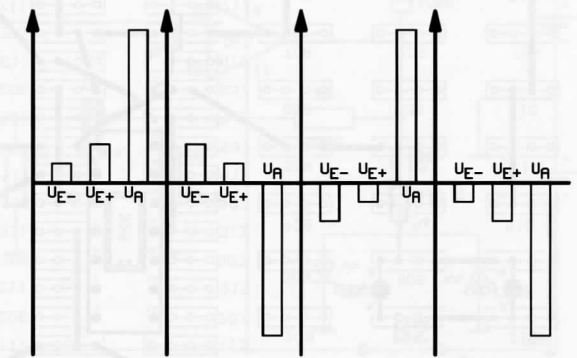
234 Het experiment van figuur 330 toont aan hoe gering de spanning maar hoeft te zijn om te bereiken dat de operationele versterker effect sorteert. Laten we maar even niet op LED1 letten, maar gewoon inschakelen en het punt zoeken waarbij LED2 begint licht te geven. Daartoe moet P1 dienovereenkomstig ver omlaag worden gedraaid. Want via *R*1 is de niet-inverterende ingang immers met massa verbonden. *C*1 elimineert brom e.d. Zolang P1 aan de inverterende ingang een ten opzichte van massa positieve spanning levert, betekent dit dat onze "waterpas" zó wordt gekipt dat de "luchtbel" (de uitgang dus) naar de ene kant (min) gaat, terwijl de negatieve spanning op de inverterende ingang de "luchtbel" naar de andere kant brengt, waarbij LED2 oplicht. In figuur 332 zie je hoe je dit goed kunt oefenen.



Figuur 330. Zo wordt een zwak signaal met een krachtige versterker verbonden.



Figuur 331. Het opbouwschema bij figuur 330.



Figuur 332. Het uitgangsgedrag van de OPAMP: alles draait om het verschil!

235 Maar hoe zit dat dan met LED1? Om daar achter te komen, kunnen we (bij voorkeur 's avonds) P1 bij niet al te veel licht zó instellen dat LED2 nèt niet oplicht. Dan schakelen we een op de tafel staande lamp in en richten die op LED1. Is er in de buurt van LED1 nu voldoende licht, dan ge-

beurt het "wonder": LED2 geeft licht! Doe het licht uit, en je zult zien dat ook LED2 dooft. Denk nog maar eens even terug aan het hoofd stukje over opto-elektronica. Daar hebben we gezien hoe pn-overgangen elektrische spanningen in licht kunnen omzetten, en licht zorgt op de pn-overgangen voor elektrische spanning. Dat is nu precies wat LED1 hier ook zojuist heeft gedaan. Maar het effect hangt wel sterk af van het type en het exemplaar. Bijzonder actief zijn hier bepaalde rode types, andere halen nog niet eens de gevoeligheid van hun groene en gele soortgenoten. Betrouwbaar en goed is de IR-LED gebleken. Probeer alle licht-emitterende diodes van je experimenteerdoos maar eens!

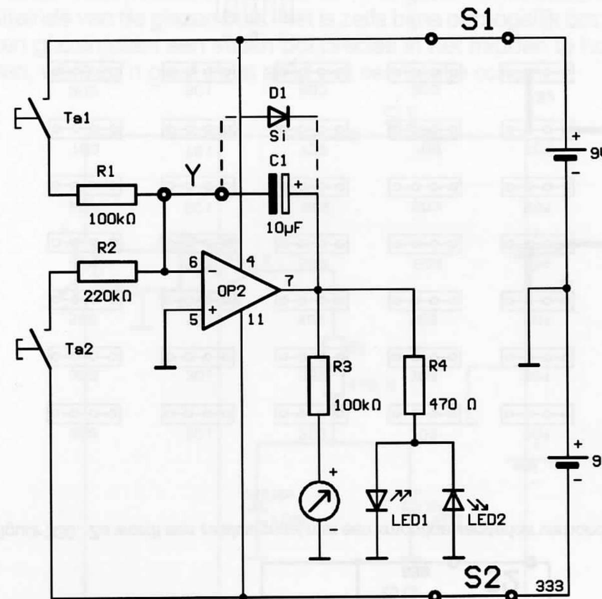
236 Nadat je de meest gevoelige diode hebt gevonden (hangt ook af van het spectrum van het gebruikte licht), moet je eens de volgende proef doen: Maak *R*1 groter door middel van een serieschakeling van 1,5 MΩ en 680 kΩ. Haal nu *C*1 weg (om een snellere reactie te krijgen). Test nu de grens van de lichtgevoeligheid van de schakeling; doe dit door ervoor te zorgen dat je hand continu op massa ligt, omdat er anders teveel brom op de schakeling komt. Je zult versteld staan, met hoe weinig licht LED2 nog reageert! Vergeet niet dat onze operationele versterker "ongeremd" een versterkingsfactor heeft van ongeveer 100.000!

237 De meest lichtgevoelige LED (de IR-LED) wordt weer in de schakeling van figuur 331 gestoken, maar deze keer met een omgekeerde polariteit. Vervolgens stellen we P1 in een niet al te heldere omgeving zó in dat LED2 net even licht geeft. Nu de lamp op de tafel inschakelen en - LED2 dooft. Wat is hier aan de hand? Juist - we hebben een dimschakelaar. Maar dan een met een LED als lichtsensor.

Comparator-praktijk: de integrator

De volgende schakelingen hebben een operationele versterker-element gemeen waarvan de niet-inverterende ingang met massa is verbonden en waarbij tussen de uitgang en de inverterende ingang een condensator is geschakeld. En omdat we de zaken hier nu eenmaal steeds op een ongebruikelijke manier aanpakken, gaan we de effecten observeren en dan de oorzaken proberen te achterhalen.

238 De schakeling zoals aangegeven in figuur 333 wordt eerst zonder *R*3 opgebouwd. We hoeven dan ook nog niet op het gevoelige meetinstrument te letten. Nu moet er een paar keer eventjes op Ta2 worden gedrukt. Je zult merken dat LED1 licht begint te geven. Bij iedere druk op de toets geeft de LED meer licht, totdat aan de uitgang het verzadigingspunt is bereikt. Je kunt de toets nu loslaten - LED1 geeft weer licht. De schakeling heeft de diverse effecten "verzameld". We noemen deze schakeling een *integrator*. Pas wanneer we op Ta1 drukken verloopt het geheel omgekeerd. LED1 geeft nu minder licht, gaat vervolgens uit, en LED2 begint op te lichten. Maar LED2 geeft vervolgens niet zolang licht als LED1 heeft gedaan.

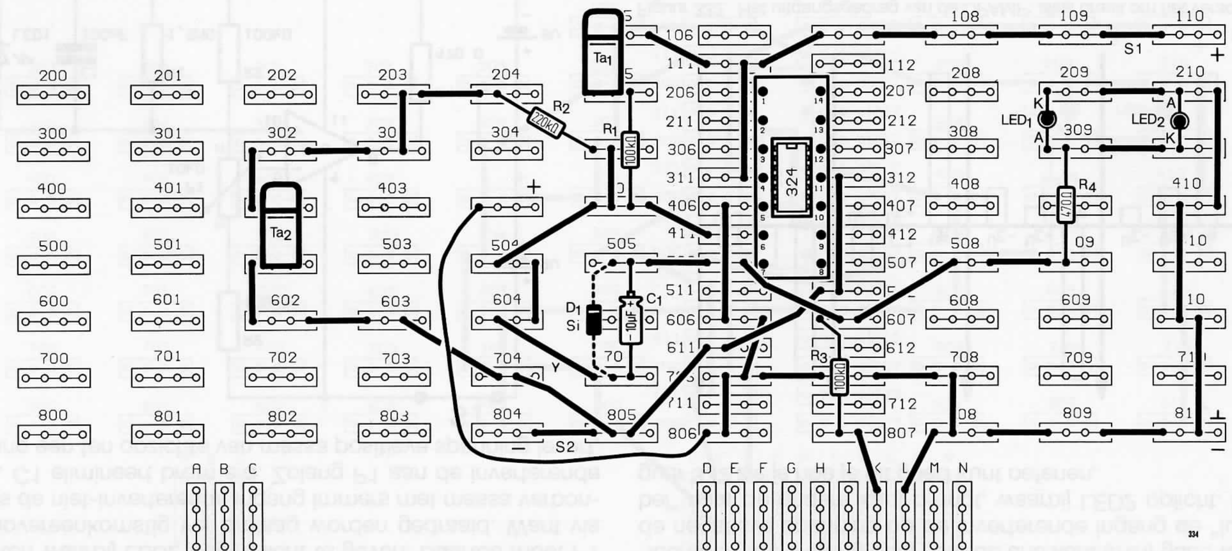


Figuur 333. Een integrator: *C* wordt stukje bij beetje gevuld.

239 We keren de polariteit van *C*1 om en herhalen het experiment. Nu is het LED1 die minder lang licht geeft dan LED2. Dit heeft te maken met de polariteit van de elco. LED1 geeft aan dat aan de uitgang het positieve verzadigingspunt bijna is bereikt. LED2 signaleert negatieve uitgangsspanning. Daarvoor is echter de polariteit van *C*1 in figuur 333 verkeerd. Hij ontlaadt zich daardoor sneller dan bij een correcte polariteit. In de praktijk wordt in die gevallen een trucje toegepast: twee even grote elco's worden "met de rug naar elkaar toe", d.w.z. min op min, met elkaar verbonden. Voor dit doel wordt in plaats van brug Y de tweede elco ingestoken. Er zal er dus steeds één correct insteken - een "ongepoolde" elco dus.

240 Laten we teruggaan naar de basisvorm zoals die is aangegeven in figuur 333 en steek nu *R*3 in. Op het meetinstrument kun je nu aflezen wat er aan de uitgang gebeurt. Druk op Ta2 en je zult zien, hoe de wijzer iedere keer iets verder uitslaat totdat het verzadigingspunt is bereikt. Met behulp van Ta1 kan dit weer ongedaan worden gemaakt. Je mag echter niet veel verder gaan dan tot aan de uitslagwaarde nul; een niet-correcte polariteit is immers ook niet goed voor het meetinstrument.

241 Parallel aan *C*1 verbinden we een Si-diode met kathode op de uitgang van de operationele versterker. Vervolgens drukken we weer op Ta1. Geen nood - we krijgen maar een geringe uitslag in de verkeerde richting te zien!



Figuur 334. Het opbouwschema bij figuur 333.

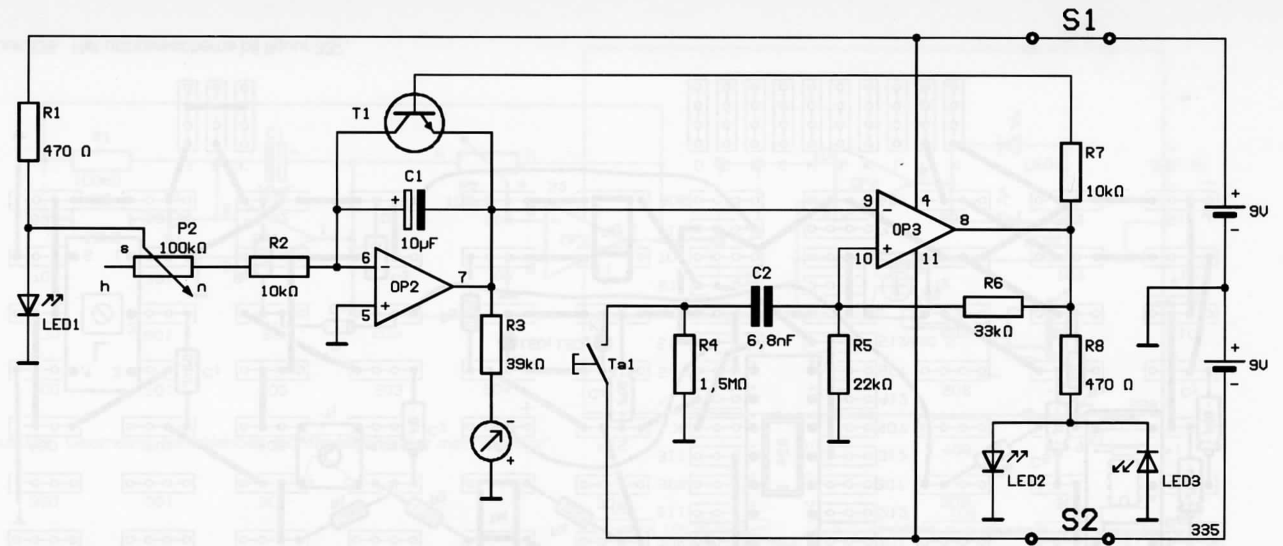
Ook LED2 geeft geen licht. Het meetinstrument is op die manier beschermd, maar de schakeling werkt nog slechts in het positieve bereik! Bedenk nog maar eens wat andere mogelijkheden om e.e.a. te beschermen en vergeet daarbij niet nog eens in hoofdstuk 19 te kijken!

Om de werking van de integrator beter te kunnen begrijpen, moeten we even vooruitlopen op wat we in het volgende hoofdstuk zullen leren. Het gaat om het begrip *virtuele massa* (d.w.z. massa die niet echt, maar slechts "qua werking" aanwezig is). Zolang de operationele versterker namelijk nog niet verzadigd is, d.w.z. dat hij de ingangssignalen dus nog kan volgen, gebeurt er vanwege de hoge versterking het volgende: de inverterende ingang voert vrijwel dezelfde spanning als de niet-inverterende. En omdat we deze met massa hebben verbonden, is ook de inverterende praktisch aangesloten op 0 V, zonder dat hij zelf met massa is verbonden. Daar zorgt de operationele versterker vanzelf voor. Telkens wanneer er op Ta1 of Ta2 wordt gedrukt, wordt *R*1 of *R*2 aangesloten op de bedrijfsspanning van dat moment. Daardoor ontstaat een stroom: $I_I = U_B/R1$ (resp. *R*2). Bij een negatieve U_B vloeit deze weg van de inverterende ingang, die "zo goed als" aangesloten is op 0 V. Maar er komt (vrijwel) niets uit de ingang. Dus moet *C*2 helpen. Deze condensator, die eerst niet geladen is (dus ook een uitgangsspanning heeft van 0 V) wordt telkens wanneer op de toets wordt gedrukt, een beetje meer opgeladen, en wel vanaf de uitgang in de richting van de virtuele massa). Dit betekent dat aan de uitgang een steeds hogere spanning nodig is. Zodra de verzadiging is bereikt, gaat dat niet meer. Pas nu treedt aan de ingang een "atypische" situatie op - aan de inverterende ingang is sprake van een duidelijk merkbare spanning. Tot dan toe is de inverterende ingang in ieder geval een op 0 V aangesloten knoop, waar de ingangsstroom de door een miniem spanningsverschil aan de ingang gestuurde uitgang in- en de even grote uitgangsstroom (via *C*1) uitstroomt.

Geïntegreerde tijd

De schakeling zoals aangegeven in figuur 335 zorgt voor een instelbare tijdschakelaar en biedt ons weer een hoop nieuwe kennis.

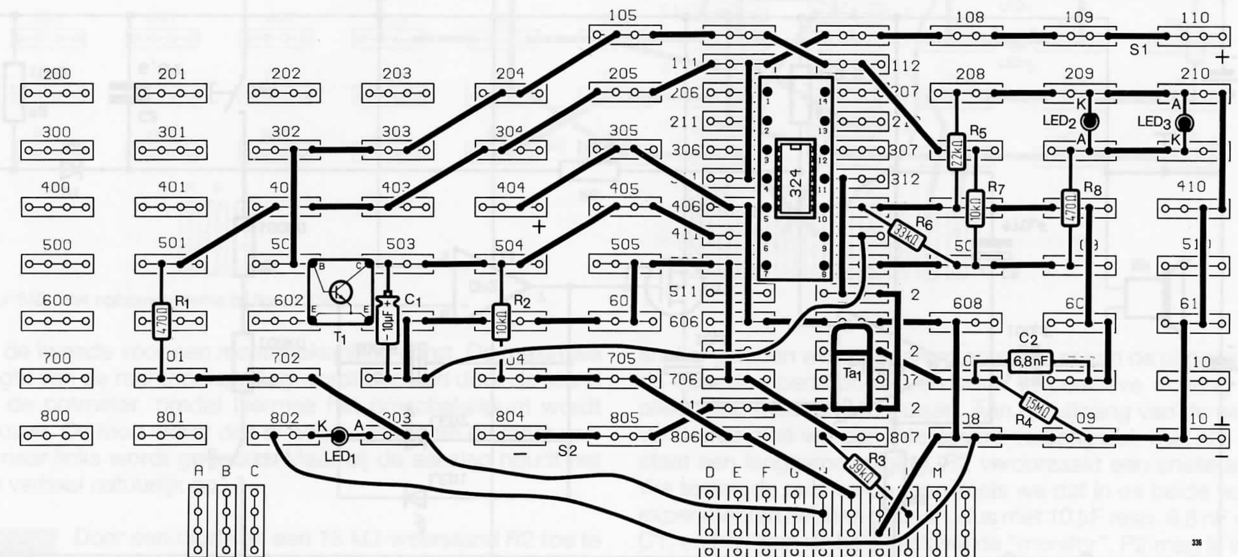
242 Let bij het opbouwen van deze schakeling op de polariteit van het meetinstrument. Plus op massa! Zet P2 eerst in de middelste stand. Zodra is ingeschakeld, zal LED2 in rusttoestand licht geven. Druk nu even op Ta1: in plaats van LED2 licht LED3 op. Maar niet lang, want dan "kipt" de hele zaak weer in de rusttoestand terug. LED1 straalt constant licht uit. Deze diode wordt alleen gebruikt als een relatief stabiele spanningsbron (LED-spanning, ca. 2 V). Druk nu opnieuw op Ta1 en kijk wat het instrument doet! De wijzer slaat uit tot in de buurt van de rechter aanslag. Maar daarna schiet hij terug in de oorspronkelijke positie, terwijl LED3 dooft. Draai nu P2 tot maximum (s tegen h) en schakel dan nog eens. Je ziet



Figuur 335. Een integrator met heel wat mogelijkheden: de tijdschakelaar.

precies hetzelfde gebeuren als daarnet, alleen duurt het nu twee keer zo lang. We hebben nu dus te maken met een instelbare tijdschakelaar.

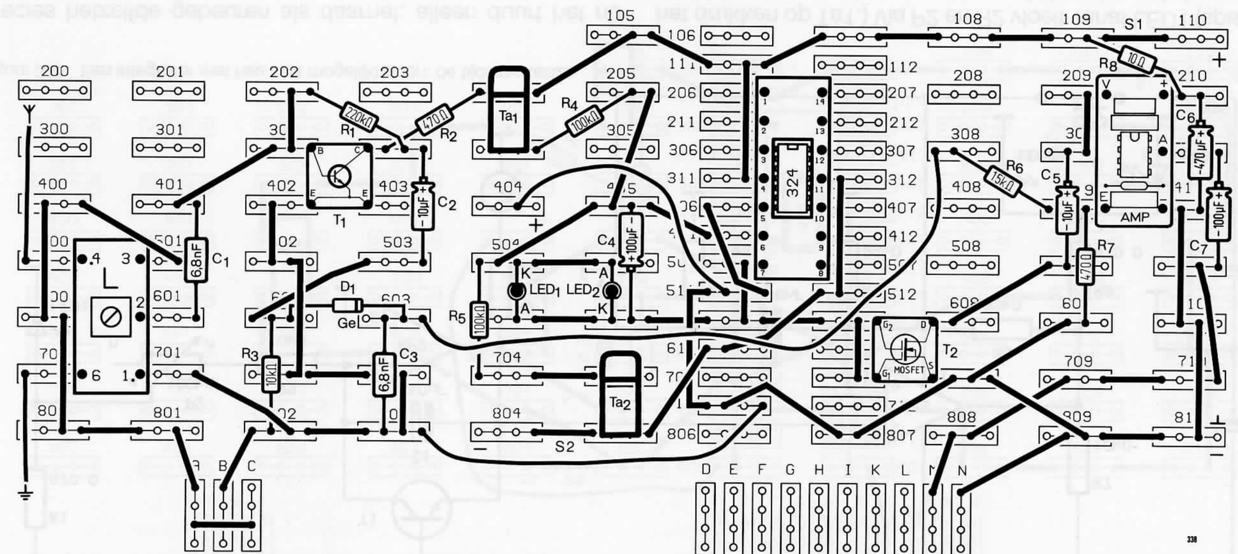
Even iets over de functie: eerst is T1 gesperd. (Dat komt door het drukken op Ta1.) Via P2 en *R*2 vloeit vanaf LED1 (spanning U_F) een stroom het knooppunt aan de inverterende ingang van de eerste operationele versterker in. Zoals we al weten, wordt *C*1 daardoor opgeladen. Overeenkomstig de "integraal" van



Figuur 336. Het opbouwschema bij figuur 335.

Figuur 337. Je moet het in je vingers hebben: geluidssterkte geregeld d.m.v. tiptoetsen.

de ingangsstroom neemt de uitgangsspanning in negatieve richting toe. Maar deze keer wordt dankzij T1 het verzadigingspunt niet bereikt. Daar zorgt de tweede operationele versterker voor. Toen we begonnen, hebben we namelijk zijn uitgang door een negatieve puls aan de niet-inverterende ingang negatief gemaakt. De spanningsdeler *R6*/*R5* houdt deze toestand vast, totdat de uitgangsspanning van de integrator de waarde van het knooppunt heeft bereikt. Vervolgens kipt de tweede operationele versterker als een echte comparator in positieve verzadiging, levert basisstroom aan T1 en ontlaadt daarmee onmiddellijk *C*1. De uitgang is weer 0 V, de uitgang van de tweede operationele versterker houdt de waarde van de positieve verzadiging, terwijl T1 geleidt. Dat blijft zo totdat er weer op Ta1 wordt gedrukt. Uit de vergelijking kun je makkelijk de tijd afleiden die met P2 en de bijbehorende stroom I kan worden ingesteld: $I = U_F(R1 + P2)$, totdat de spanning (-) U_T is bereikt. Gedurende deze tijd t vloeit de lading $Q = I \cdot t$ naar $C1$. Dus is $U_T = Q/C = I \cdot t/C$, d.w.z. $t = U_T \cdot C/I$. Denk er daarbij aan dat *C*1 wel zo'n 50 % hoger kan zijn dan de nominale waarde! Met 470 µF kom je op een actief-tijd van meer dan 10 minuten - om het even wat je ermee wilt sturen, van het licht in het trappenhuis tot de toevoer van verse lucht.



Figuur 338. Het opbouwschema bij figuur 337.

Een herrie-integrator

In het volgende experiment werken een groot aantal reeds bekende losse schakelingen samen.

243 Voor de kern van de schakeling zoals aangegeven in figuur 337 kunnen ook andere geluidssignaalbronnen worden gebruikt. Het hoeft dus niet per sé het uitgangssignaal van de ontvanger te zijn, dat via *R*6 wordt toegevoerd. Hoe sterk het geluid is dat aan de andere kant uit SP komt, bepalen we met behulp van de beide tiptoetsen; druk je op Ta1, dan wordt de uitgang van de operationele versterker negatief, wordt de weerstand van T2 en daarmee de negatieve terugkoppeling van de AMP groter en de geluidssterkte minder. Het omgekeerde wordt met Ta2 bereikt. En dat allemaal proportioneel: hoe korter je op de toets drukt, des te geringer is de verandering. Na het loslaten blijft de ingestelde toestand "opgeslagen". Wanneer *C*4 bij een verkeerde polariteit te snel zou worden ontladen, dan moet je doen wat we al eerder hebben beschreven (de polariteits-onafhankelijke elco door het anti-serieel schakelen van een andere 100 µF-elco). Hier wordt dan echter wel de laadspanning door LED1 en LED2 in beide richtingen begrensd op ca. 2 V. Daarmee wordt ook tegemoet gekomen aan het nuttige stuurbereik van de MOSFET.

Amplitude-geometrie

Met maar een paar bouwelementen zorgen we in het volgende experiment voor een heleboel interessante effecten, namelijk de golfvormige curves.

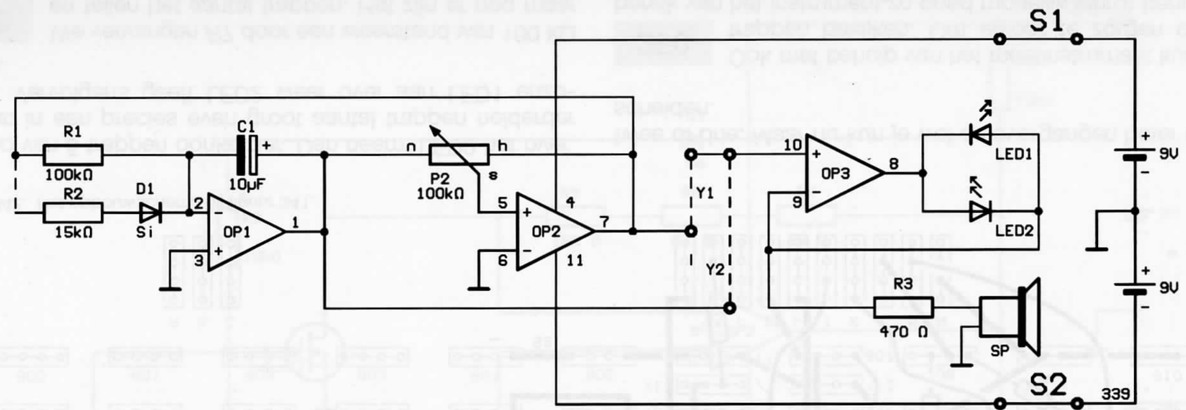
244 Nadat we de schakeling zoals aangegeven in figuur 339 (nog zonder *R*2 en D1) hebben opgebouwd, moet de loper van P2 eerst op een lage waarde (minder dan 30 %) zijn ingesteld (s in richting van n). Bij 10 µF voor *C*1 kijken we wat de licht-emitterende diodes doen, wanneer er aan P2 wordt gedraaid - naar links tot aan de aanslag, naar rechts hoogstens tot in het midden. Om te kijken hoe de uitgang reageert, gebruiken we de derde operationele versterker als "monitor". Hij ontkoppelt de uitgangs-"lasten" van de voor belasting gevoelige punten. De niet-inverterende ingang wordt daarbij om beurten op iedere uitgang van de beide anderen aangesloten.

De monitor op de eerste operationele versterker: wisselen van licht met "zachte" overgangen. De LED die op een bepaald moment "actief" is, geeft steeds meer licht, wordt dan weer donkerder, vervolgens neemt de andere het over en ga zo maar door.

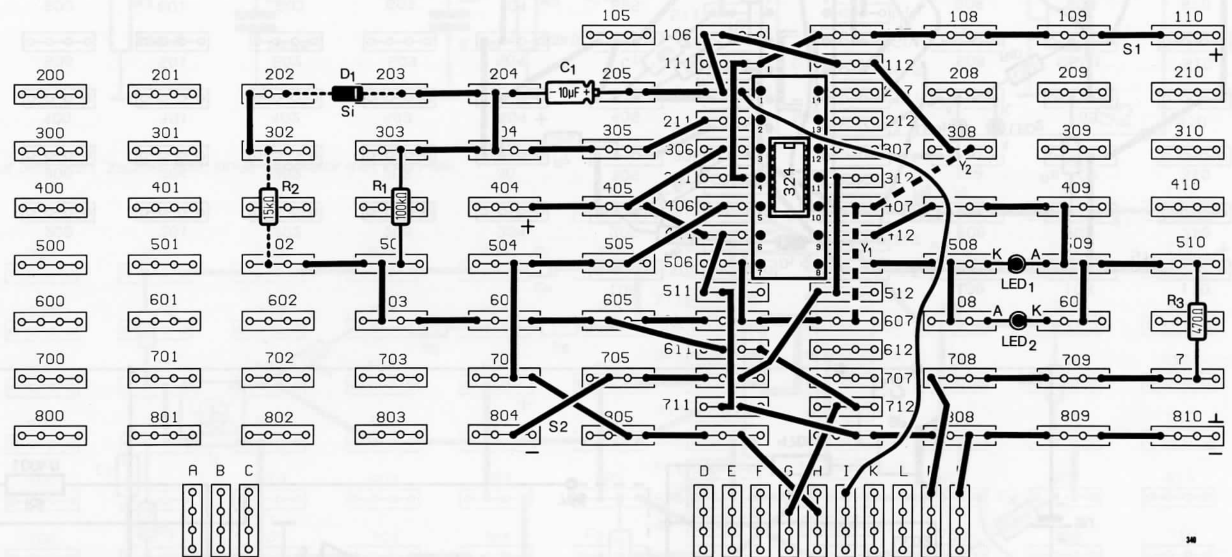
De monitor op de tweede operationele versterker: de beide LED's knipperen afwisselend met "harde" overgangen.

245 We vervangen *C*1 in figuur 339 (10 µF) door 6,8 nF. Deze keer gaat het om het geluid. Bij de eerste operationele versterker klinkt het zachter, maar bij de tweede versterker is een hard geluid te horen.

De LED-tests hebben aangetoond dat de uitgang van de eerste operationele versterker voor een *driehoekstrilling* en die



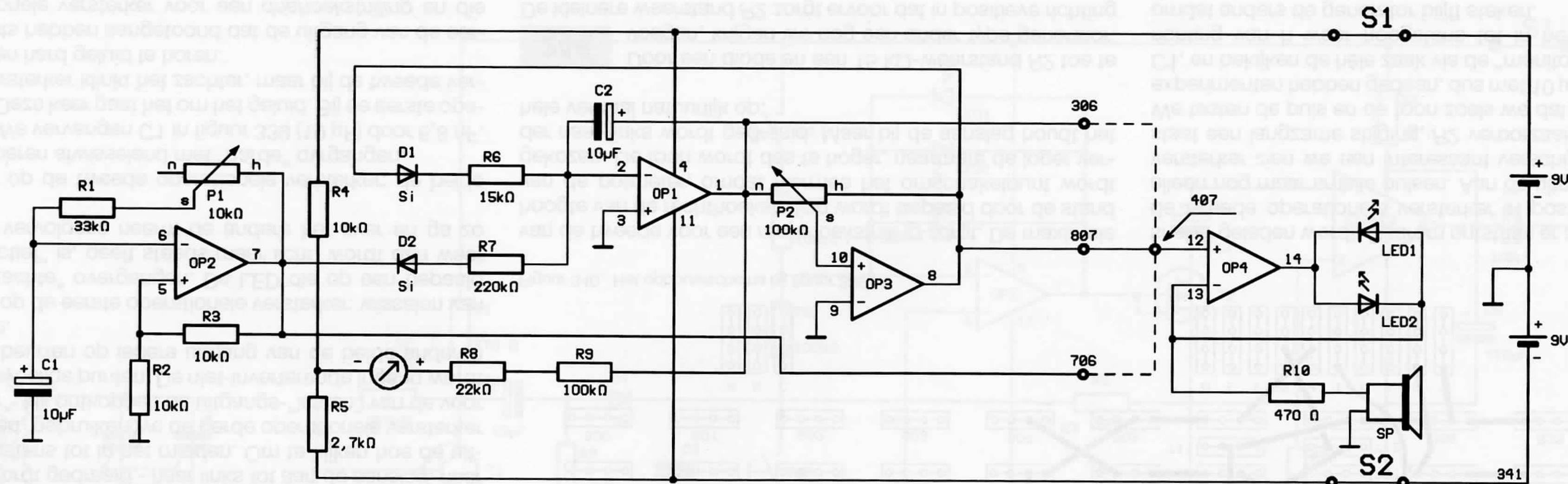
Figuur 339. Geometrie: een driehoek-rechthoekgenerator met "monitor".



Figuur 340. Het opbouwschema bij figuur 339.

van de tweede voor een *rechthoekstrilling* zorgt. De maximale hoogte van de rechthoekstrilling wordt bepaald door de stand van de potmeter, omdat hiermee het omschakelpunt wordt gekozen. De toon wordt des te hoger, naarmate de loper verder naar links wordt gedraaid. Maar bij de aanslag houdt het hele verhaal natuurlijk op.

246 Door een diode en een 15 kΩ-weerstand *R*2 toe te voegen, krijgen we nog een ander type generator. De kleinere weerstand *R*2 zorgt ervoor dat in positieve richting sneller geladen wordt. Daarom ontstaan er aan de uitgang van de tweede operationele versterker in positieve richting ook alleen nog maar smalle pulsen. Aan de uitgang van de eerste versterker zien we een interessant verschijnsel: met *R*1 ontstaat een langzame stijging, *R*2 veroorzaakt een snelle afval. We testen de puls en de toon zoals we dat in de beide vorige experimenten hebben gedaan, dus met 10 µF resp. 6,8 nF voor *C*1, en bekijken de hele zaak via de "monitor". P2 mag je in de richting van h weer hoogstens tot in het midden draaien, omdat anders de generator blijft steken.



Figuur 341. Een trapspannings-generator: stapje voor stapje omhoog.

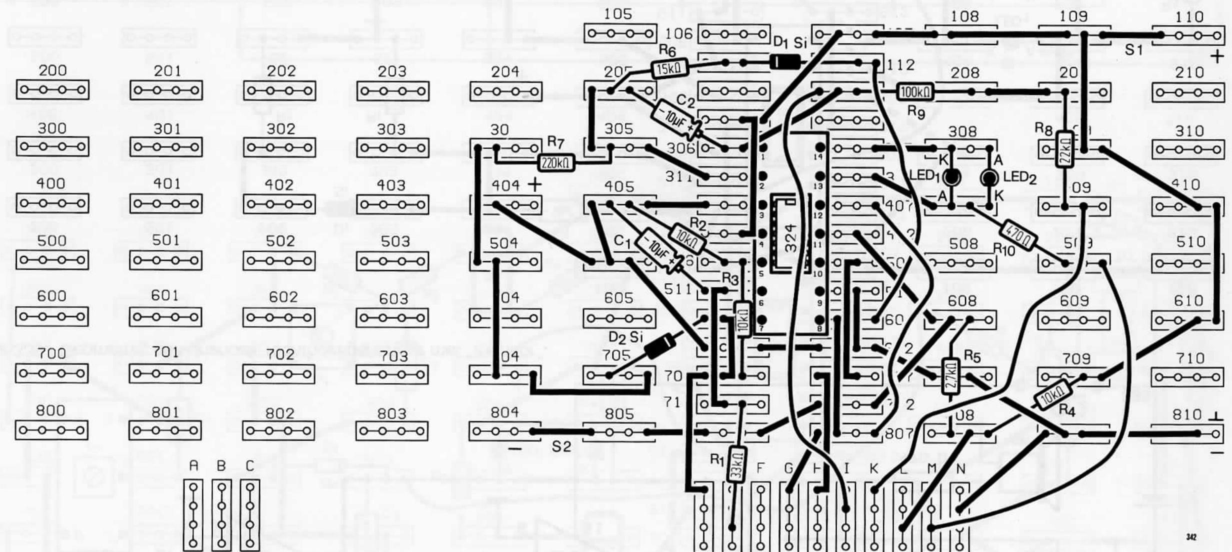
Stapje voor stapje - telkens een trede hoger

Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 341 leren we nog een andere schakeling kennen die in de wereld van de "functie-generatoren" wordt gebruikt. Het is een schakeling waarmee we een *trapspanning* opwekken. Een dergelijke spanning wordt in de meettechniek en in de muziek-electronica gebruikt. En laat je fantasie maar eens de vrije loop, dan vind je zeker nog meer toepassingsmogelijkheden!

247 Aan de schakeling van het experiment van daarnet wordt vooral een blokgolfgenerator toegevoegd (eerste operationele versterker, in de figuur "OP2"). Voor *C*1 nemen we eerst in plaats van 10 µF, slechts 0,1 µF en voor *C*2 zelfs slechts 6,8 nF. P1 en P2 draaien we tot ongeveer 1/3 boven n. Zolang *R*1 niet meedoet, bedraagt de ingestelde waarde van P1 ongeveer 6 kΩ. De toon die uit de luidspreker komt, klinkt tamelijk rauw. Wanneer we aan P2 draaien, verandert de toonhoogte, maar wel met sprongen! Hoe kleiner de met P1 ingestelde waarde is, des te meer "toontrappen" kun je met P2 ten gehore brengen. Het klinkt zo'n beetje als dat draaiorgeltje dat je vroeger kreeg toen je nog klein was.

248 Door voor *C*1 en *C*2 elk 10 µF te gebruiken (zie de figuur) worden ook de licht-emitterende diodes erbij betrokken. Bovendien kan P1 door een vaste weerstand van 33 kΩ worden vervangen. Dat geeft ons meer tijd om te bekijken wat er gebeurt. LED1 en LED2 knipperen namelijk om beurten, maar wel op een heel aparte manier - met een "getrapte" helderheid. Zijn de gebruikte licht-emitterende diodes erg helder, dan kun je dat beter zien, wanneer *R*10 wordt verhoogd tot 1 kΩ. LED1 begint heel helder en wordt in de loop van 5 trappen donkerder. Dan neemt LED2 het over, die dan in een precies even groot aantal trappen helderder wordt. Vervolgens geeft LED2 weer over aan LED1 enzovoorts.

249 We vervangen *R*7 door een weerstand van 100 kΩ en tellen het aantal trappen. Het zijn er nog maar twee of drie. Maar nu kun je wel de overgangen beter onderscheiden.



Figuur 342. Het opbouwschema bij figuur 341.

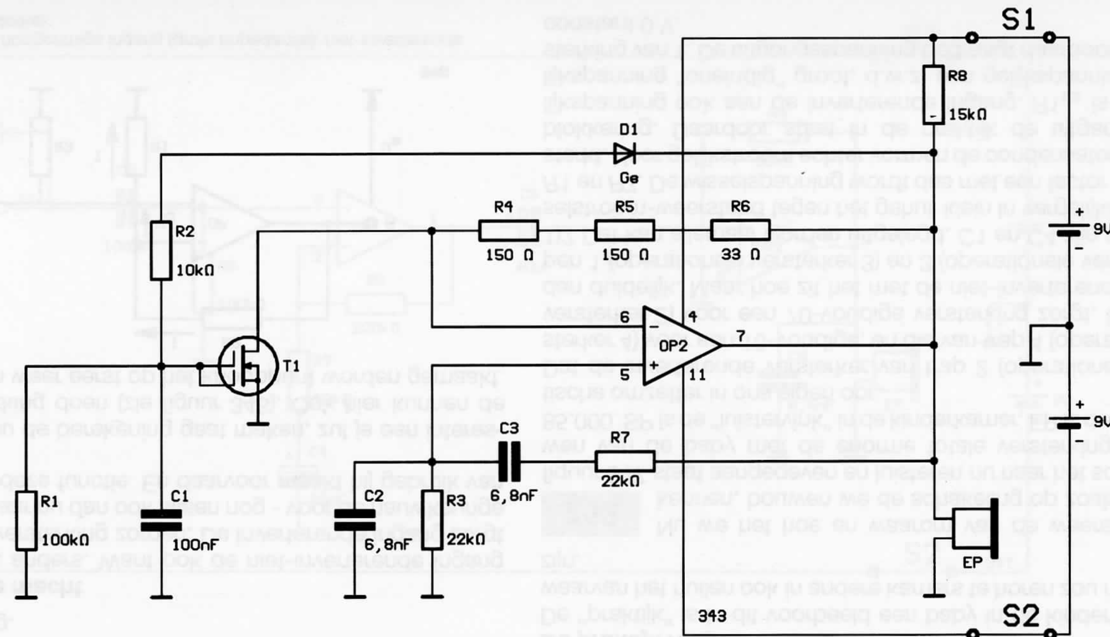
250 Ook met behulp van het meetinstrument kun je de trappen bekijken. Om ervoor te zorgen dat het bereik van het instrument zo goed mogelijk wordt benut, zet-

ten we de negatieve verzadigingsspanning met een trucje buiten spel. We sluiten de min-aansluiting van het instrument niet rechtstreeks aan op de negatieve spanning, maar op een spanningsdeler. Die deler zorgt ervoor dat het "min-punt" op een overeenkomstig hoger niveau komt te liggen.
Nog even iets over de "knowhow" van deze proeven. De blokgolfgenerator met $C1$ en P1 resp. $R1$ is een van de vele "elegante" oplossingen voor operationele versterker-schakelingen. Of aan de uitgang nu een positieve of een negatieve verzadigingsspanning staat, de niet-inverterende ingang wordt door de deler $R3$, $R2$ steeds op een afgeleide waarde van deze spanning gehouden. Zolang deze waarde niet is bereikt, wordt $C1$ over P1 (en $R1$) opgeladen, en vervolgens kipt de schakeling, totdat de andere verzadiging is bereikt, waarna de hele geschiedenis zich weer herhaalt. De negatieve verzadigingsspanning voedt de integrator in stappen die telkens weer opnieuw worden onderbroken. Zodra het punt is bereikt waarop aan de loper van P2 een spanning van 0 V staat, een punt dat met P2 kan worden ingesteld, schakelt de uitgang van de als comparator functionerende derde operationele versterker heel even naar de positieve verzadiging. (Deze uitgang voert normaal een negatieve verzadigingsspanning.) Hierbij wordt $C2$ in een door $R6$ en $C2$ bepaalde tijd omgeladen. De uitgang van de integrator schakelt daardoor van de positieve over op de negatieve verzadiging. Het "traplopen" begint op dit punt opnieuw, en dat kun je aan de licht-emitterende diodes zien.

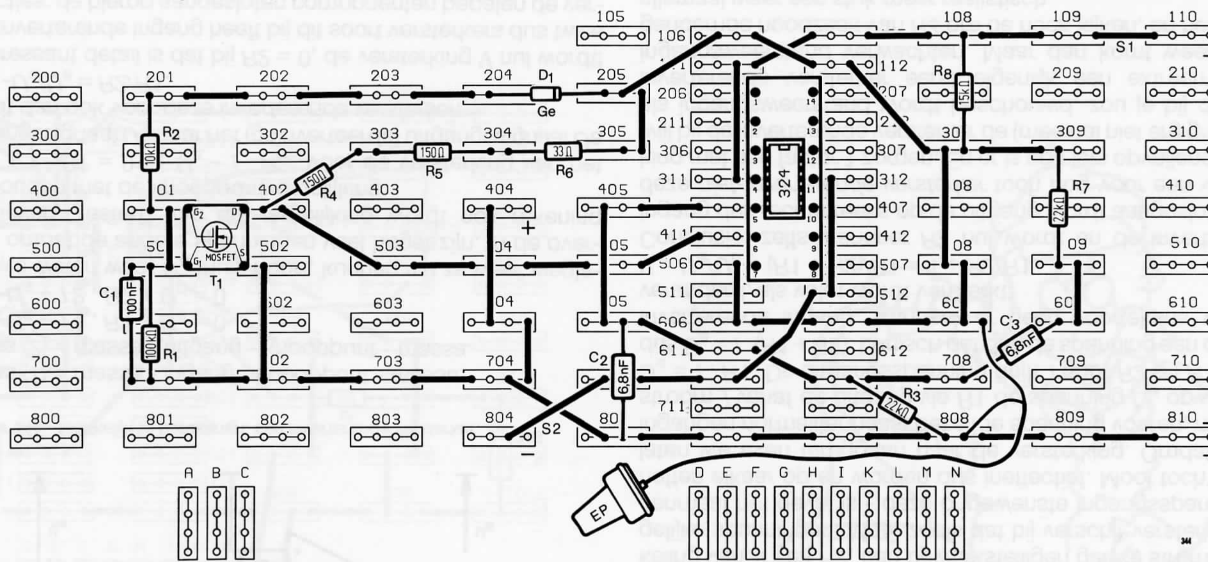
Sinus - de zachte overgangen

Zelfs de meest merkwaardige curve-vorm is een samenstel van meerdere losse sinus-trillingen. Dat is ooit ontdekt door ene meneer *Fourier*. Om a priori één enkele sinus-trilling te genereren kost behoorlijk wat moeite. Daarbij speelt de negatieve terugkoppeling een rol - weg met alles, wat het "zachte" verloop stoort!

251 Na het opbouwen van de schakeling zoals aangegeven in figuur 343 geeft EP een aangenaam geluid. Wordt $R2$ eruit getrokken, dan wordt het geluid niet alleen harder, maar ook lelijker. Wanneer $R7$ wordt overbrugd, dan lijkt het op het geluid van een brommer. Het geluid is weg, wanneer $R4$ of $R5$ wordt overbrugd. De schakeling luistert dus heel nauw; alles moet bij elkaar passen. Het is zelfs mogelijk dat de schakeling helemaal niet op gang komt. In dat geval moet $C2$ met $C3$ worden verwisseld. Qua opdruk zijn die twee weliswaar gelijk, maar toleranties (de mate waarin de exemplarische waarde van de nominale afwijkt) zijn er altijd. De reële waarde van $C3$ moet groter zijn dan die van $C2$. Condensatoren geleiden nu eenmaal des te beter, naarmate de frequentie f hoger is. Dat is nu juist de truc met de serieschakeling van $C3$ met $R7$ en de parallelle schakeling van $C2$ met $R3$. Wordt f hoger, dan stijgt de spanning over de parallelle schakeling,



Figuur 343. Een "zachte" golf: sinus-generator met Wien-tak.



Figuur 344. Het opbouwschema bij figuur 343.

maar dan neemt wel de wisselstroom-weerstand af. En ook het fase-verschil tussen uitgangs- en ingangsspanning, dat zo belangrijk was bij de fase-verschuivings-generator die we al eens eerder hebben opgebouwd verandert voortdurend. Slechts voor *één* punt is alles optimaal. Hebben R en C dezelfde waarden, dan is dat het geval bij $f_r = 1/(2\pi RC)$. Daar-

bij gaat van de uitgangsspanning nog slechts éénderde naar de niet-inverterende ingang. Bij een versterking met factor 3 wordt dus slechts deze frequentie opgewekt en "precies correct" versterkt. De correcte versterking wordt aan de inverterende ingang bewaakt. Met MOSFET als stuurbare weerstand en de Ge-diode (lage spanning in doorlaat!) als gelijkrichter voor de ten behoeve van de vergelijking gebruikte negatieve halve golven van de trilling. De schakeling zorgt op die manier voor zichzelf; er vindt steeds net zoveel versterking plaats als voor een stabiele sinus-trilling van de resonantiefrequentie nodig is. Deze sympathieke eigenschap van zo'n RC-combinatie is ontdekt door ene meneer Wien. Daarom spreken we van het Wien-element en ook wel van de Wien-generator. Overigens speelde hierbij ook een zekere Robinson een rol.

25. Versterking op maat

De kogel op de plaat die nooit helemaal horizontaal is. Dat is ons symbool voor de enorme versterking van de "ongeremde" operationele versterker.

100.000 keer - dat betekent dat voor een "beweging" van 10 volt aan de uitgang een "opdraaien", een ingangsspanning dus, van 100 µV (microvolt, dus een miljoenste volt!) al voldoende is. Voor de uitwendige schakeling, die met veel hogere spanningen werkt, staat aan de beide ingangen vrijwel dezelfde spanning. Maar met maar twee weerstanden is de operationele versterker al heel gewillig te sturen.

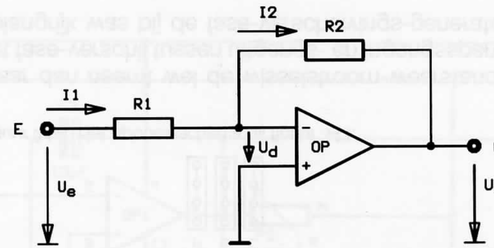
Met de veer op de kogel

Je kunt een kogel met twee veren in de middenpositie houden. Wanneer de plaat dan iets wordt gekanteld, zal de zwaartekracht de kogel weliswaar naar beneden trekken, maar de veren houden hem tegen. De ene veer trekt en de andere drukt. Zo zorgen ze al naar gelang de neiging van de plaat en de stijfheid van de veren voor een begrenzing van de beweging van de kogel.

Een inverterende ingang met twee taken

In elektronisch opzicht zijn de beide veren twee weerstanden: *R*1 komt tussen de spanning die moet worden versterkt en de inverterende ingang. *R*2 wordt tussen deze ingang en de uitgang geschakeld (figuur 345). Via *R*2 heeft de uitgang een "remmend" effect op de ingang. Er is dus een terugkoppeling ontstaan. We hebben dat ook al bij de transistoren gezien. En in het vorige hoofdstuk hebben we al het een en ander gezegd over dit soort schakelingen.

*R*1 is eigenlijk, wanneer we het nauwkeuriger bekijken, de som van alle tussen de spanningsbron en het ingangsknooppunt werkende weerstanden. Daar hoort ook de inwendige weerstand van de signaalbron bij. Wanneer we alle weerstanden kennen, kan de schakeling makkelijk worden berekend. We weten alles over het ingangsknooppunt: er vloeit net zoveel stroom in als er weer uit komt: $I1 = I2 = I$. Bij onze observaties houden we "voorlopig" nog even rekening met het minieme spanningsverschil U_d tussen de ingangen en we bekijken de mazen:



Figuur 345. Makkelijk te berekenen: een inverterende versterker.

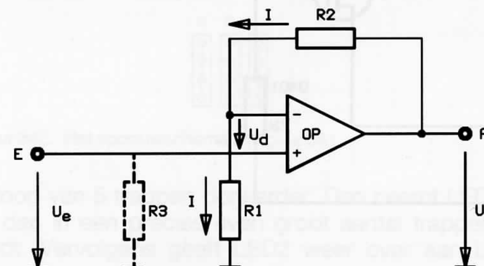
Maas (1) = massa - ingang - knooppunt - massa;
Maas (2) = massa - uitgang - knooppunt - massa.
(1): $-U_e + I1 \cdot R1 + U_d = 0$
(2): $-U_a + I2 \cdot R2 + U_d = 0$

Nu we weten waar U_d thuis hoort, kunnen we ze weer weglaten, omdat de andere spanningen veel hoger zijn. In de overgebleven "resten" van de vergelijking wordt ook rekening gehouden met de knooppuntvergelijking:
$-U_e + I \cdot R1 = 0 = -U_a - I \cdot R2$. Voor de versterking van het ingangssignaal *Ue* naar het (geïnverteerde) uitgangssignaal *Ua* geldt dan ook voor deze *inverterende versterker:*
$V = -U_a/U_e = R2/R1$.
Interessant detail is dat bij *R*2 = 0, de versterking V nul wordt! De inverterende ingang heeft bij dit soort versterkers dus twee functies: de hierop aangesloten componenten bepalen de versterking en de weerstand aan de ingangszijde is de ingang van de schakeling.

Delen van de macht

Het gaat ook anders. Want ook de niet-inverterende ingang kan voor de versterking zorgen. De inverterende ingang zorgt dan weer - maar nu dan ook alleen nog - voor de nauwkeurige controle van deze functie. En daarvoor maakt hij gebruik van *R*1 en *R*2.

Wanneer je nu de berekening gaat maken, zul je een interessante ontdekking doen (zie figuur 346). Ook hier kunnen de berekeningen weer eerst op het knooppunt worden gemaakt.



Figuur 346. Een hoogohmige ingang (grote impedantie): niet-inverterende versterker.

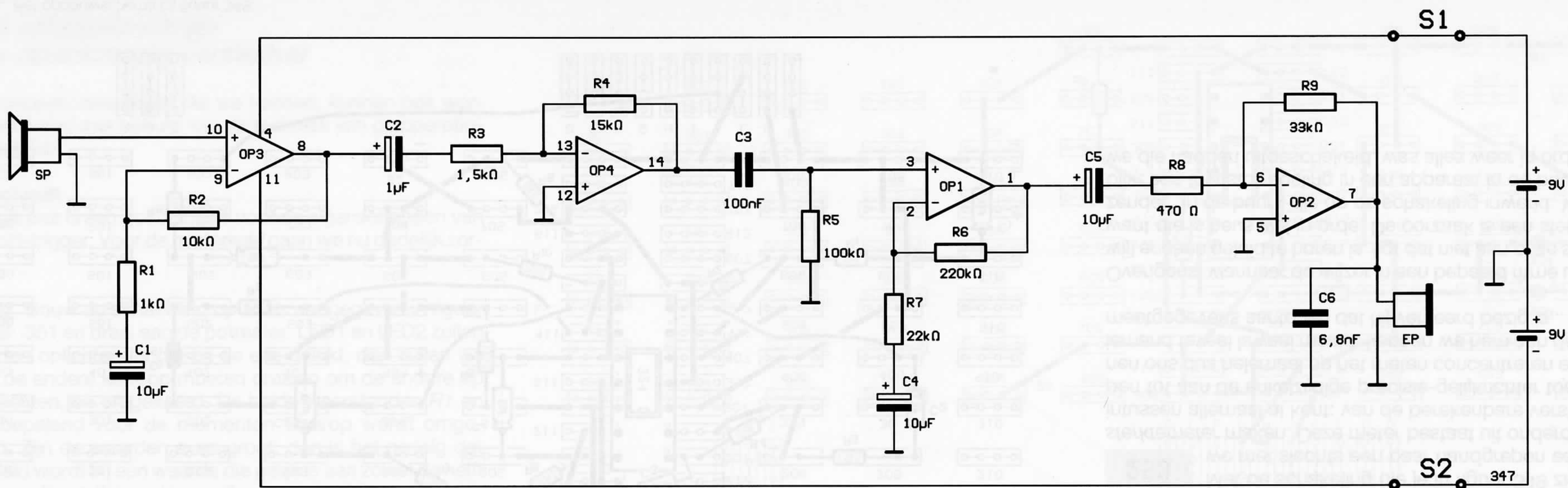
Maar daarbij moet je dan wel weer rekening houden met de minieme ingangsstroom die functioneel noodzakelijk is. In figuur 346 zie je dan ook alvast *R*3 aangegeven. Voor het geval de bron geen weg heeft voor de gelijkstroom! Wanneer de waarde van *R*3 net overeenkomt met die van de parallelschakeling van *R*1 en *R*2, dan bewerkstelligen gelijke stromen ook gelijke spanningen. Maar zoals dat bij verschil-versterkers nu eenmaal het geval is - deze ongewenste ingangsspanningen heffen elkaar op en worden dus ineffectief. Mooi toch? Maar laten we even teruggaan naar de versterking. Omdat beide ingangen normaliter haast dezelfde spanning voeren, moet de stroom I vanaf de uitgang via *R*1 de spanning U_e opwekken: $U_e = I \cdot R1$. De uitgangsspanning drijft I door *R*2 en *R*1 heen, dus $U_a = I \cdot (R1 + R2)$. Logisch dat dan de spanning aan de niet-inverterende ingang, wanneer er geen voortekens worden veranderd, als volgt wordt versterkt:
$V = U_a/U_e = (R1 + R2)/R1 = 1 + R2/R1$.
Conclusie: zelfs wanneer *R*2 nul wordt en de inverterende ingang dus rechtstreeks op de uitgang wordt aangesloten, zal deze *niet-inverterende versterker* toch nog voor een versterking met een factor 1 zorgen. En er is nog iets opvallends. Terwijl bij de inverterende versterker de (meestal niet erg grote) *R*1 als ingangsweerstand wordt beschouwd, zou je bij de niet-inverterende versterker eerst eigenlijk een extreem hoge ingangsweerstand verwachten. Maar dan komt weer de al genoemde noodzaak van *R*3 om de hoek kijken, en het wordt allemaal weer een stuk meer realistisch.

De praktijk roept

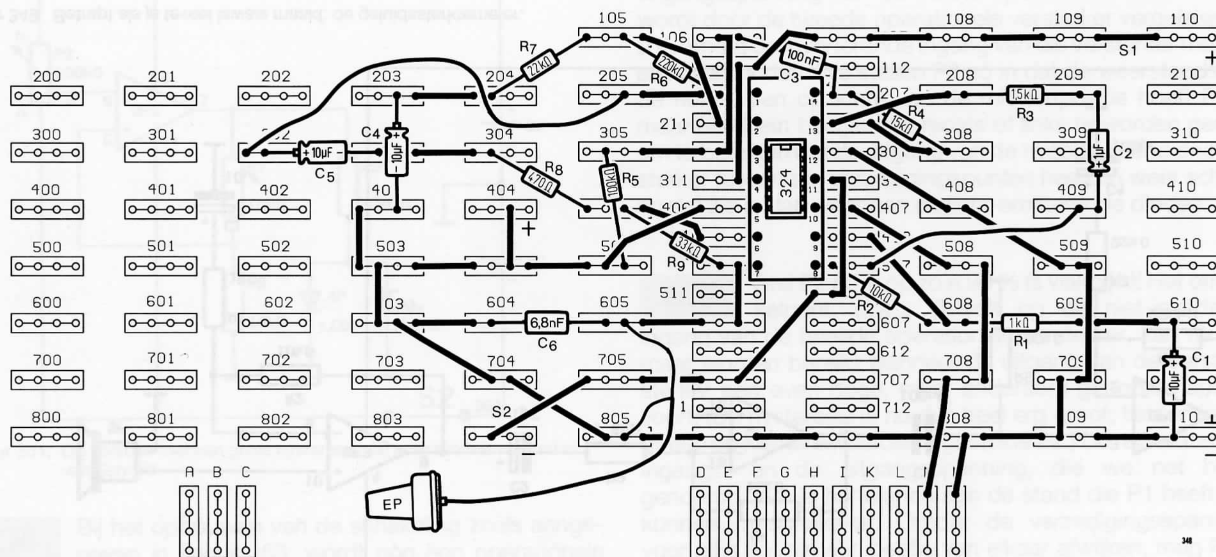
De "praktijk" is in dit voorbeeld een baby in de kinderkamer, waarvan het huilen ook in andere kamers te horen zou moeten zijn.

252 Nu we het hoe en waarom van de weerstanden kennen, bouwen we de schakeling op zoals die in figuur 347 staat aangegeven en luisteren nu naar het schreeuwen van de baby met de enorme totale versterkingsfactor 85.000. SP is de "luistervink" in de kinderkamer, EP is de akoestische omzetter in ons eigen oor.

Dat de inverterende versterker van trap 2 (operationele versterker 4) voor een 10-voudige, en die van trap 4 (operationele versterker 2) voor een 70-voudige versterking zorgt, is meer dan duidelijk. Maar hoe zit het met de niet-inverterende trappen 1 (operationele versterker 3) en 3 (operationele versterker 1)? Dat kan allemaal worden uitgelegd. *C*1 en *C*4 zijn als wisselstroom-weerstand tegen het gehuil klein in vergelijking met *R*1 en *R*7. De wisselspanning wordt dus met een factor 11 versterkt. Voor gelijkstroom echter vormen de condensatoren een blokkering. Daardoor staat in de praktijk de uitgangs-gelijkspanning ook aan de inverterende ingang. $R1_{tot}$ is bij gelijkspanning "oneindig" groot, d.w.z. een gelijkspanningsversterking van 1. De uitgangsspanning bedraagt daardoor vrijwel constant 0 V.

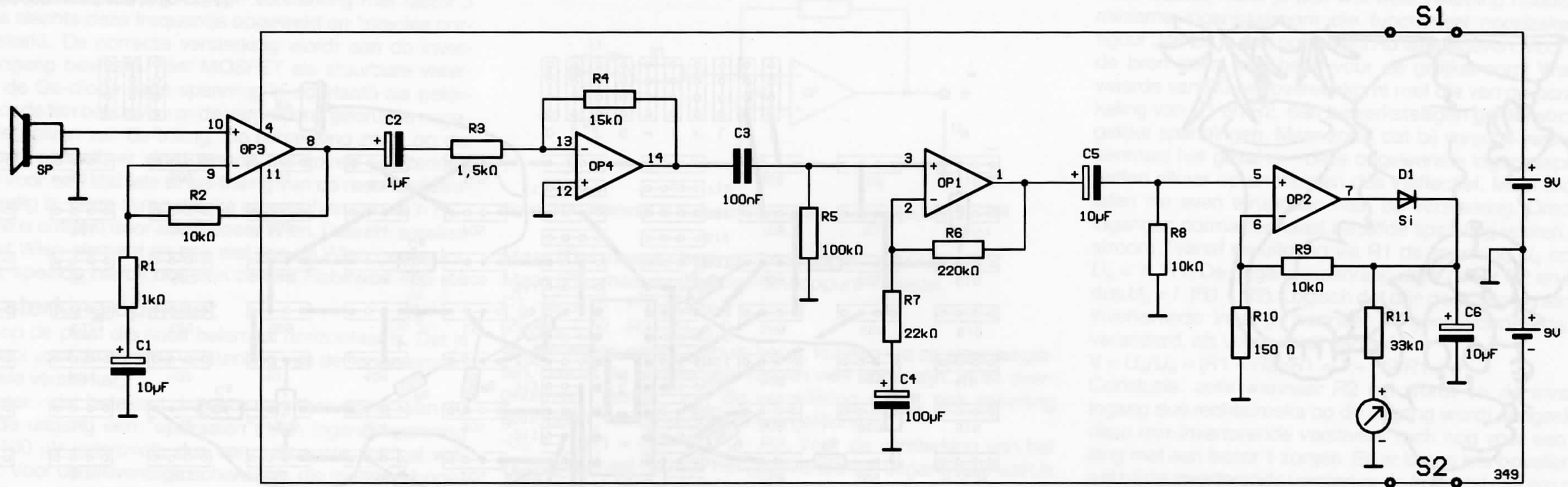


Figuur 347. Met je oor bij het mandje: meer dan 85.000 keer versterkt.

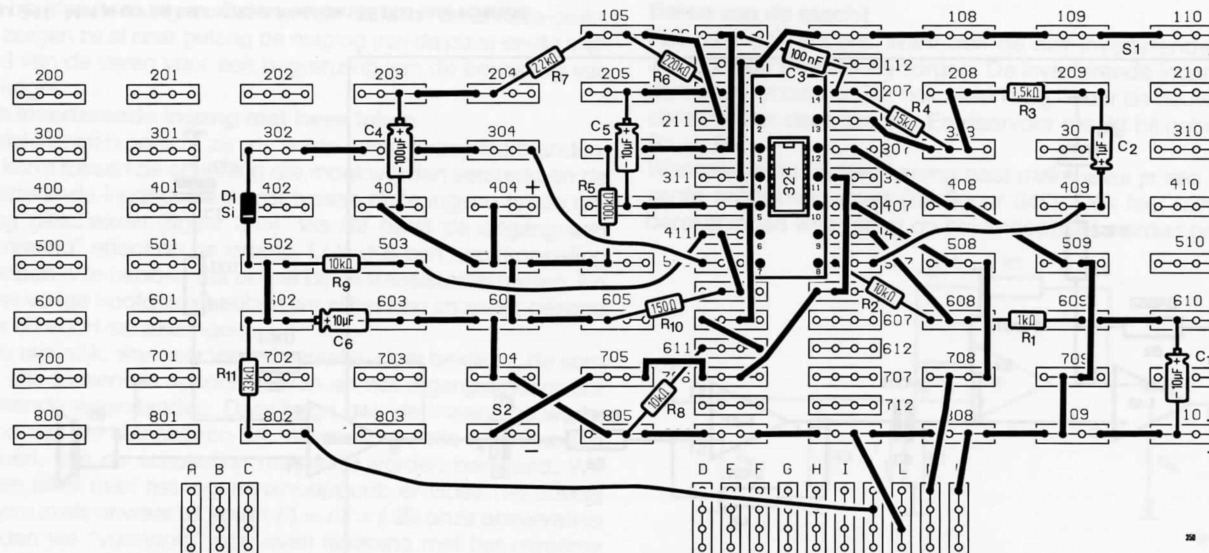


Figuur 348. Het opbouwschema bij figuur 347.





Figuur 349. Betrapt als je teveel lawaai maakt: de geluidssterktemeter.



Figuur 350. Het opbouwschema bij figuur 349.

Het lawaai op het spoor

Huilende baby's horen gewoon bij het leven. Maar lawaai schaadt de gezondheid. Oorzaken zijn makkelijker te bestrijden, wanneer we ze kunnen meten en vergelijken. Dus gaan we de babysitter klaarmaken voor een andere functie.

253 Met de schakeling die je in figuur 349 ziet, kunnen we met slechts een paar handgrepen een *geluidssterktemeter* maken. Deze meter bestaat uit onderdelen die je intussen allemaal al kent: van de berekenbare versterkertrappen tot aan de enkelzijdige precisie-gelijkrichter toe. We kunnen ons dus helemaal op het meten concentreren en wanneer iemand teveel lawaai maakt, kunnen we hem aan de hand van meetgegevens aantonen dat hij verkeerd bezig is...

Overigens: wanneer de wijzer in een bepaald ritme uitslaat terwijl er geen geluid te horen is, ligt dat niet aan onze schakeling, want die is heus wel in orde. De oorzaak is een sterke "stoorzender" in de buurt, die op de schakeling inwerkt. Wij hadden bijv. een thyristorregeling in een apparaat in de buurt, en toen we die hadden uitgeschakeld, was alles weer in orde.

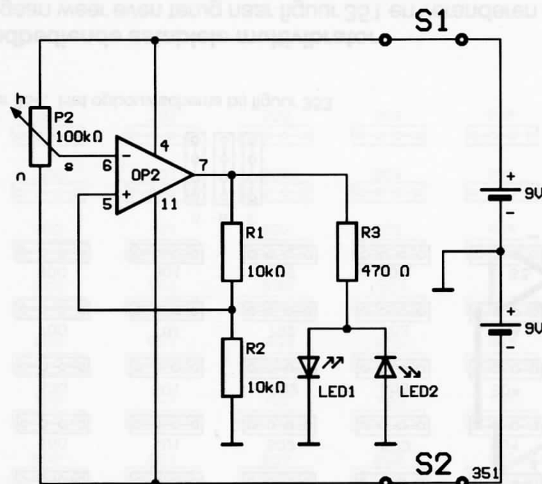
26. De schakelcentrale van de operationele versterker

Alle standaardschakelingen die we kennen, kunnen ook worden opgebouwd met behulp van de techniek van de operationele versterker.

OP(A) Schmitt

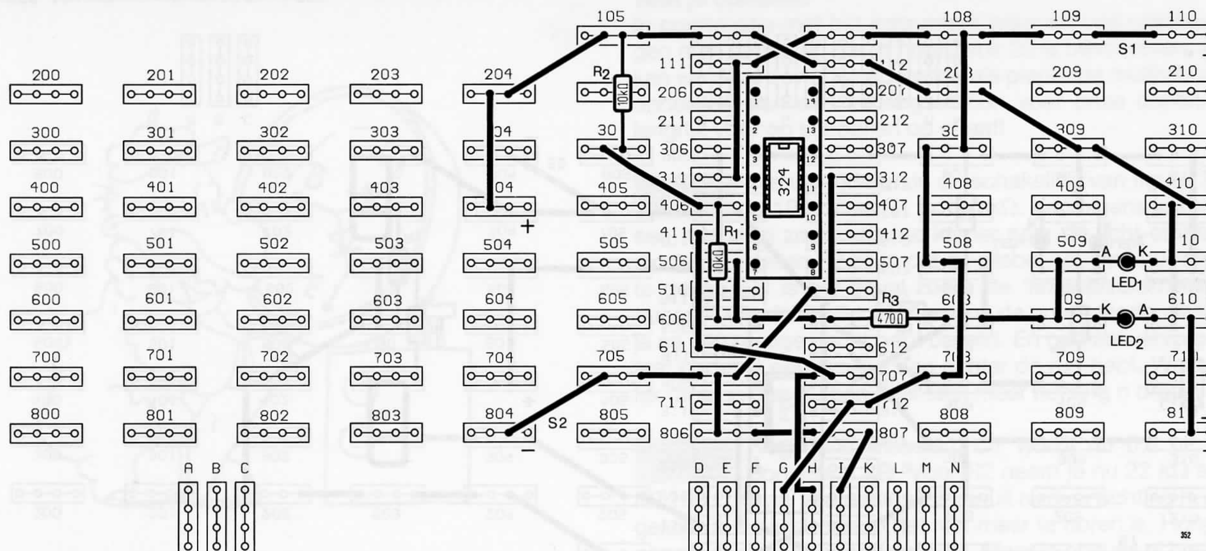
De comparator is een goede basis voor de eigenschappen van de Schmitt-trigger. Voor de hysteresis gaan we nu dadelijk zorgen.

254 Bouw de schakeling op zoals aangegeven in figuur 351 en draai aan de potmeter. LED1 en LED2 zullen om beurten oplichten. Is dat bij de ene gelukt, dan zullen we heel ver de andere kant op moeten draaien om de andere op te laten lichten, en omgekeerd. De beide weerstanden *R1* en *R2* zijn bepalend voor de momenten waarop wordt omgeschakeld. Zijn de waarden even groot, dan is het gevolg dat geschakeld wordt bij een waarde die gelijk is aan zowel de helft van die van de positieve als van die van de negatieve verzadigingsspanning. Verander je *R2* in kleinere waarden (bijv. 5,6 kΩ, 1 kΩ), dan wordt de hysteresis kleiner; wanneer je *R2* groter maakt (bijv. 33 kΩ, 100 kΩ), dan wordt hij groter.



Figuur 351. Op verzoek met een grote hysteresis: de operationele versterker van Schmitt.

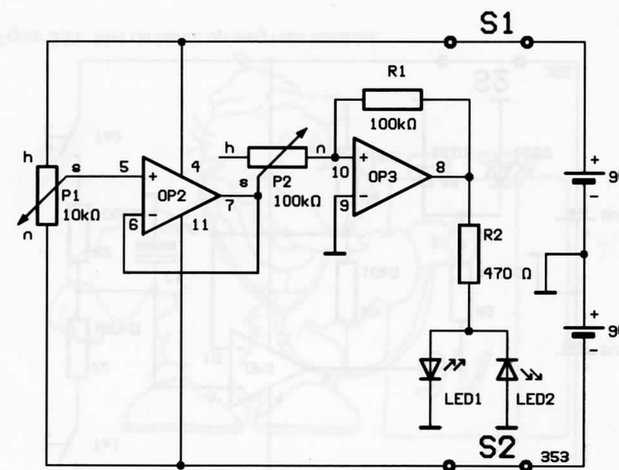
255 Bij het opbouwen van de schakeling zoals aangegeven in figuur 353, wordt nòg een operationele versterker als "één-versterker" gebruikt om de signaalspanning en het schakelmoment van elkaar te scheiden. De stuurspanning wordt op de niet-inverterende ingang van de trigger



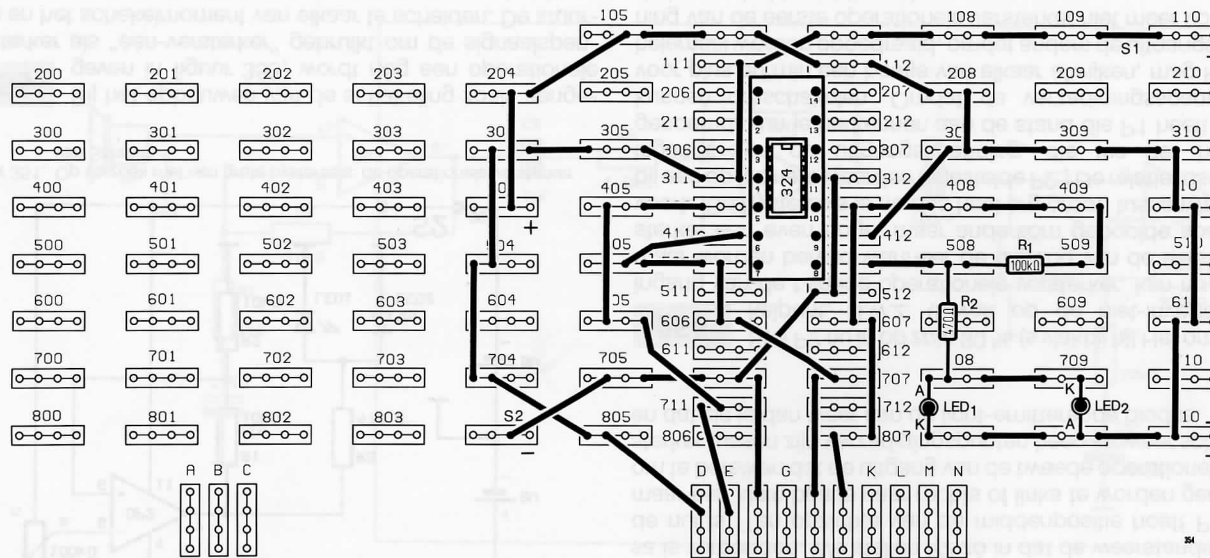
Figuur 352. Het opbouwschema bij figuur 351.

gezet. De op P1 ingestelde spanning is dus vrijwel gelijk aan de uitgangsspanning van de eerste operationele versterker. Ze wordt door de tweede operationele versterker vergeleken met 0 V, omdat de inverterende ingang van die versterker met massa is verbonden. We stellen P2 zó in dat de weerstandswaarde nul is. Ten opzichte van de middenpositie hoeft P1 dan maar een klein beetje naar rechts of links te worden gedraaid om te bereiken dat de uitgang van de tweede operationele versterker tussen zijn verzadigingspunten heen en weer schakelt; en dat zie je dan weer aan de licht-emitterende diodes.

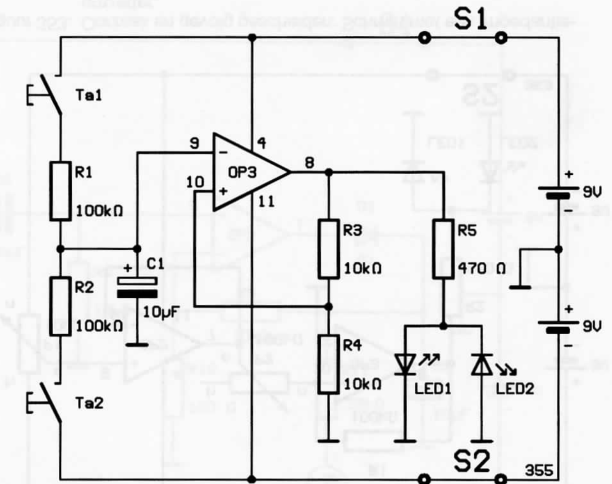
256 Stel P2 nu in op zo'n 90 % (s vlakbij h)! Het omschakelpunt, d.w.z. 0 volt op de niet-inverterende ingang van de tweede operationele versterker, kan nu alleen maar worden bereikt wanneer de uitgang van de eerste versterker een even hoge, maar andersom gepoolde spanning voert. (De hysteresis is nu dus heel erg groot; tussenwaarden bij een op kleinere waarden ingestelde P2.) De relatie tussen de ingangs- en de uitgangsspanning, die we net hebben genoemd, kun je herkennen aan de stand die P1 heeft om te kunnen omschakelen. Omdat de verzadigingsspanningen voor plus en min een beetje van elkaar afwijken, mag P2 niet helemaal worden opgedraaid, omdat anders de uitgangsspanning van de eerste operationele versterker niet meer voldoende is voor beide richtingen!



Figuur 353. Oorzaak en gevolg gescheiden: Schmitt met een impedantie-omzetter.



Figuur 354. Het opbouwschema bij figuur 353.



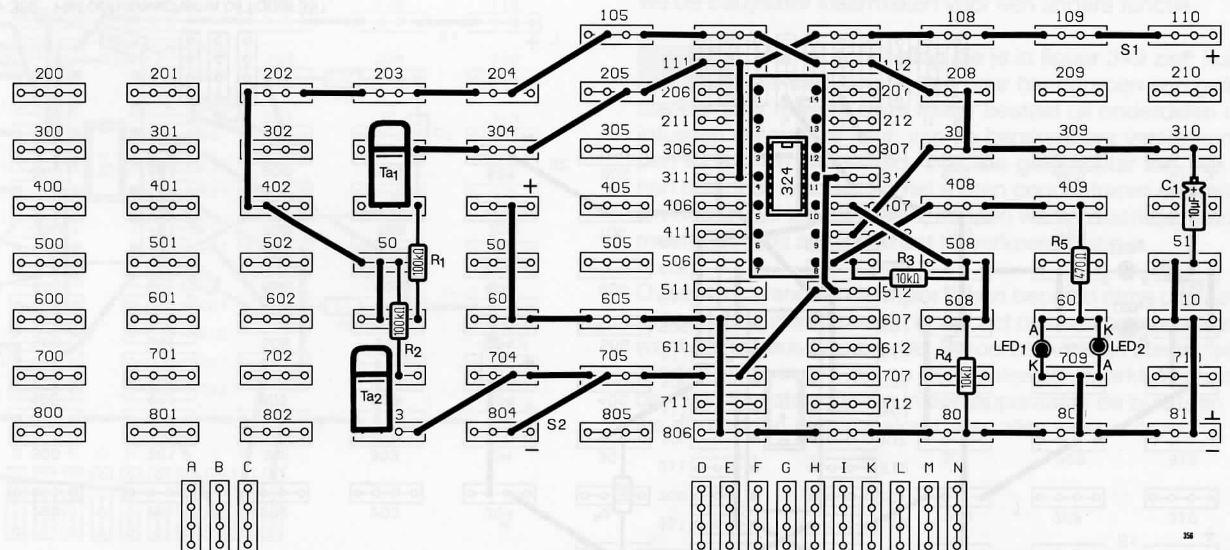
Figuur 355. Met de hand: op weg naar astabiel.

Handbediende astabiele multivibrator

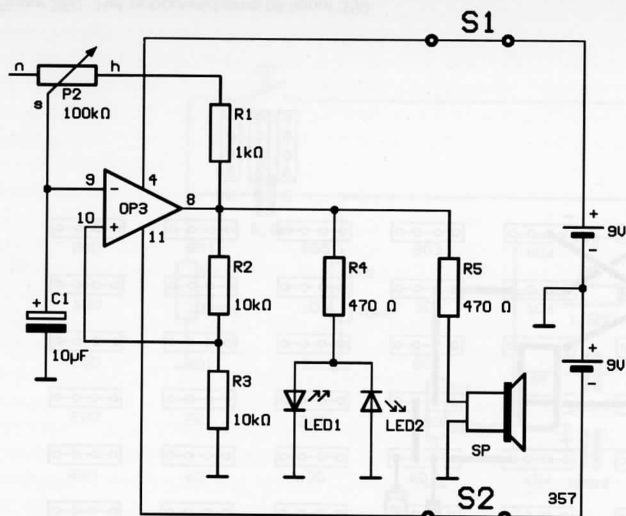
We gaan weer even terug naar figuur 351 en veranderen nu de beginvoorwaarden.

257 Zoals je in figuur 355 ziet, wordt *C*1 gedurende ongeveer 1 seconde via Ta1 resp. Ta2 opgeladen (100 kΩ, 100µF). Telkens wanneer de spanning over *C*1 een waarde bereikt die gelijk is aan de halve verzadigingsspanning, schakelt de uitgang in de andere grenspositie. Het heeft geen zin om *C*1 nog verder op te laden. Dus kun je de druktoets loslaten. Als gevolg van de lekstroom ontlaadt de elco zich daarna min of meer snel. Maar hoogstens tot 0 volt, en dat hoeft dan nog niet te betekenen dat de operationele versterker nu omschakelt. De toestand blijft dus zoals ze is. Pas wanneer er gebruik wordt gemaakt van de andere druktoets, komt er verandering in. Licht LED1 op, dan moet je op Ta1 drukken; geeft LED2 licht, dan gebeurt er pas iets wanneer je 2 seconden lang op Ta2 drukt. Over met een verkeerde polariteit aangesloten elco's hebben we het al eens eerder gehad. Geen paniek dus!

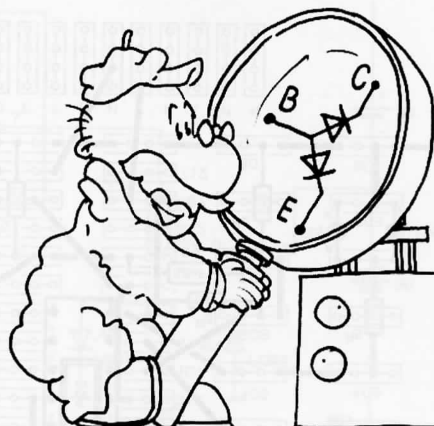
258 Na wijziging van de schakeling overeenkomstig figuur 357 kunnen we het opladen van *C*1 rustig aan de schakeling overlaten. Hoe snel dat moet gebeuren, wordt bepaald door P2 in te stellen. Om een kleine tegenspanning op de elco te krijgen, gebruiken we de delerverhouding 1 : 1 alleen voor deze eerste "ronde". We stellen P2 in op de hoogste waarde (s op n). De licht-emitterende diodes knipperen nu onophoudelijk en om beurten - want zo gedraagt zich een astabiele multivibrator gewoonlijk. De luidspreker produceert alleen maar een zacht krakend geluid. Die luidspreker hebben we dadelijk nodig.

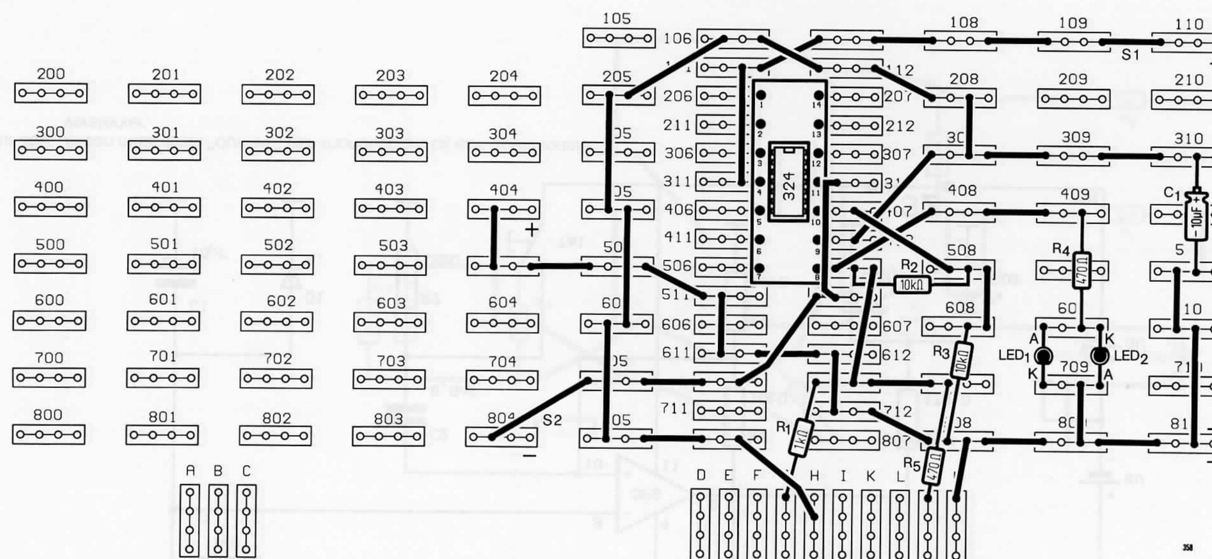


Figuur 356. Het opbouwschema bij figuur 355.



Figuur 357. Op eigen kracht: astabiel tussen de verzadigingspunten.



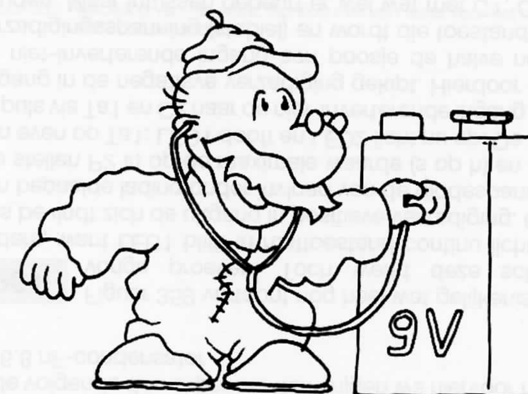


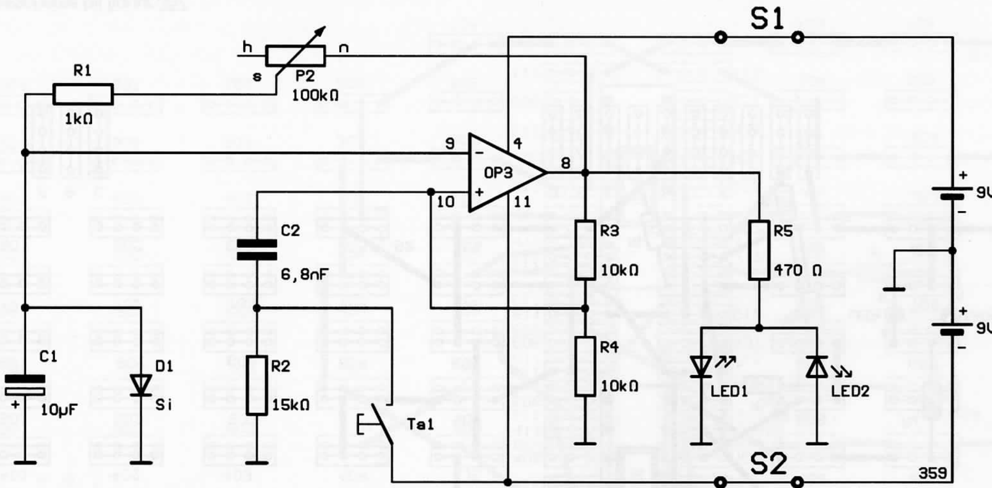
Figuur 358. Het opbouwschema bij figuur 357.

Test je conditie!
In combinatie met het instrument waar we ons reactievermogen mee testen en dat in hoofdstuk 20 is beschreven, gebruiken we deze zowel knipperende als piepende multivibrator als onderdeel van een keuringsstation voor onze conditie. Belangrijk voor op school en op straat!

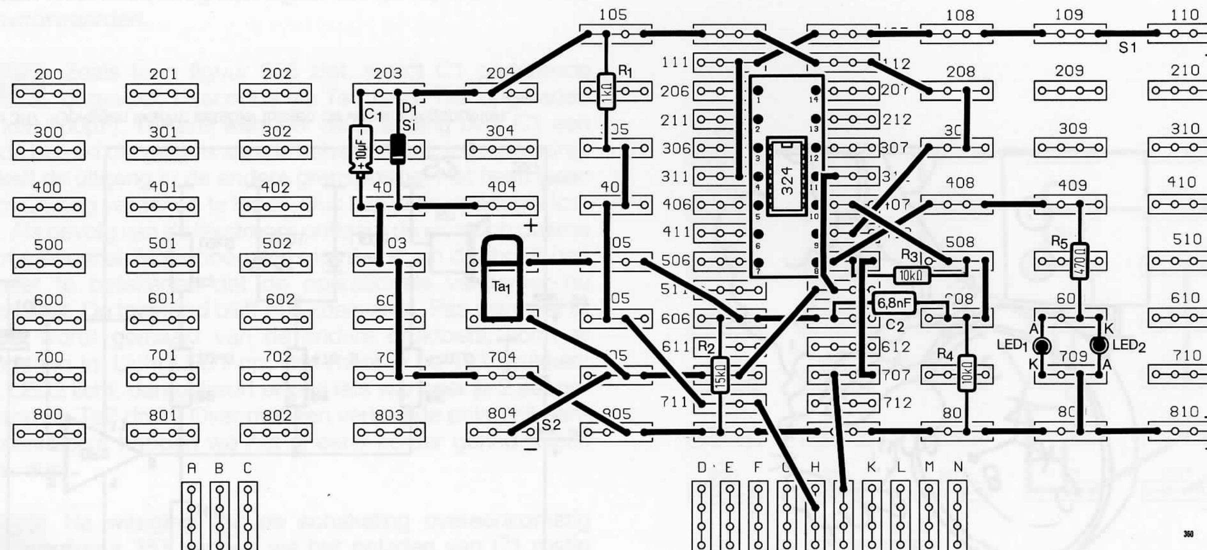
259 We veranderen in de schakeling van figuur 357 *C*1 in 100 nF en *R*1 in 100 kΩ. Vervolgens kijken we in een niet al te zeer verlichte kamer naar de licht-emitterende diodes en stellen P2 zó in dat ze allebei nèt continu licht lijken te geven. Dit is het geval zodra de *"knipperversmeltingsfrequentie"* wordt bereikt. Markeer op de potmeter de waarde die je na een rustige nacht hebt bereikt. En herhaal vervolgens de test nadat je een drukke dag achter de rug hebt. Waarschijnlijk moet je dan P2 een heel stuk meer richting n draaien.

260 Nog eens wisselen: *C*1 wordt nu 6,8 nF en *R*1 opnieuw 1 kΩ. Voor *R*2 neem je nu 22 kΩ en voor *R*3 150 Ω. Draai vervolgens P2 vanuit n zóver richting h, dat het geluid uit de luidspreker net niet meer te horen is. Honden en vogels denken daar anders over. Maar je opa zal al heel gauw niets meer horen. Maar wie een bijzonder goed gehoor heeft, zal misschien zelfs nòg eens 6,8 nF met *C*1 in serie moeten schakelen. Dat is beter dan P2 verder op te draaien tot aan de aanslag, want dan zouden de trillingen wel eens kunnen stoppen.





Figuur 359. Alleen maar even "duwen": een monoflop als bij een operationele versterker.



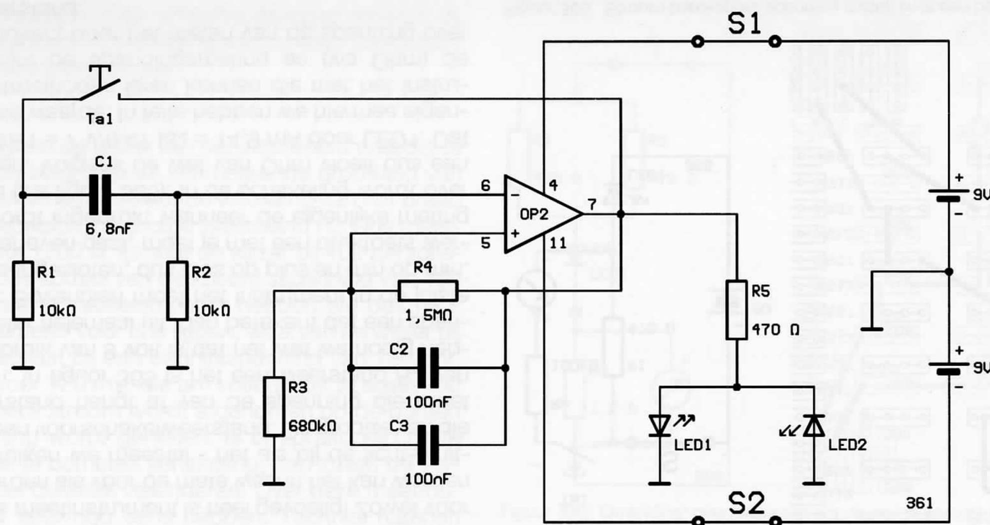
Figuur 360. Het opbouwschema bij figuur 359.

Overgang en ondergang

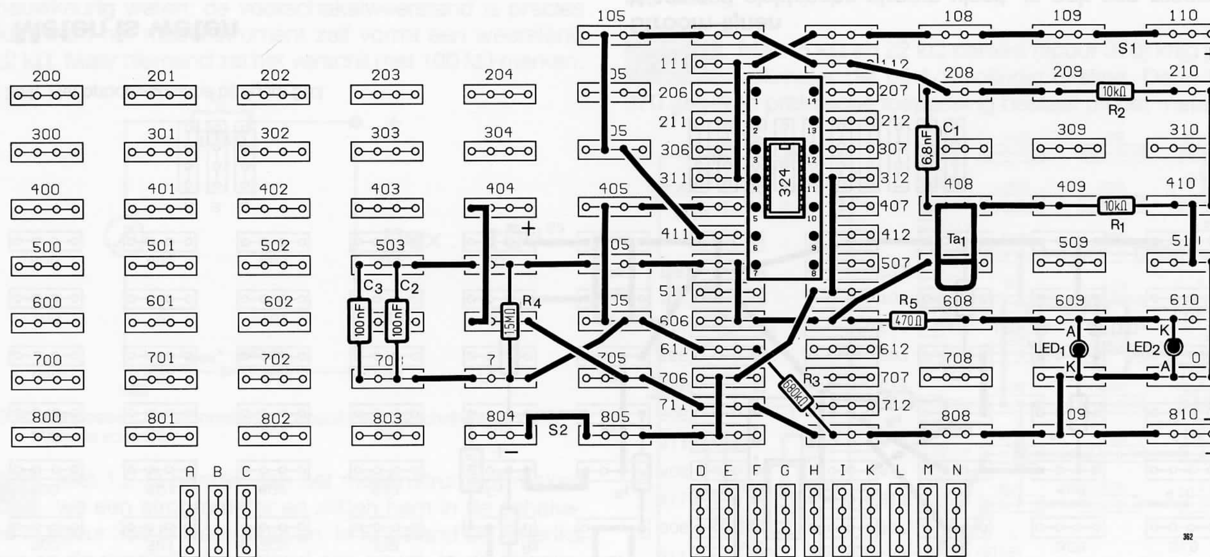
Laten we nog maar eens lachen. Want het gaat om de monoflop en de flip-flop. Allebei hebben ze even een "duwtje" nodig om hun toestand te veranderen. Hoe je dat doet, weten we al. In de volgende drie experimenten krijgen we hiervoor hulp van de 6,8 nF-condensator.

261 Figuur 359 vertoont nog heel wat gelijkenis met de vorige proeven. Toch werkt deze schakeling anders, want LED1 blijft in rusttoestand continu licht geven. Dus bevindt zich de uitgang in positieve verzadiging. *C*1 heeft een bepaalde lading onder invloed van de diodespanning D1. We stellen P2 in op de maximale waarde (s op h) en drukken dan even op Ta1: LED1 dooft en LED2 licht nu op. De negatieve puls via Ta1 en *C*2 naar de niet-inverterende ingang heeft de uitgang in de negatieve verzadiging gekipt. Hierdoor staat op de niet-inverterende ingang een poosje de halve negatieve verzadigingsspanning (stabiel) en wordt die toestand vastgehouden. Maar intussen gebeurt er wel wat met *C*1. *C*1 wordt namelijk door de nu omgekeerde uitgangsspanning via P2, *R*1, geladen. Natuurlijk wèl tot de halve negatieve verzadigingsspanning. Dan kipt de schakeling en de nu weer positieve uitgangsspanning doet de lading op *C*1 weer afnemen.
Druk nu onmiddellijk na het terugschakelen op de druktoets, voordat de lading van *C*1 is afgenomen! LED2 zal nu duidelijk minder lang licht uitstralen. Hoe komt dat? Welnu, *C*1 is immers voor een deel nog geladen. Dat zul je nog duidelijker merken wanneer je 2 x 10 µF- of een 100 µF-elco voor *C*1 gebruikt.
Een controlevraag. Waarvoor dient *R*2? Juist. Samen met *R*4 zorgt *R*2 voor het ontladen van *C*2. En daardoor kan dan ook de volgende puls worden overgebracht. Een negatieve proef: Trek *R*2 eruit en houd Ta1 een poosje ingedrukt. Wanneer je nu weer probeert te starten, lukt het beslist niet. Breng *R*2 maar weer aan en alles is weer zoals het zijn moet.

262 We komen heel dicht in de buurt van wat al helemaal geen zin meer heeft, en wel vanwege de ingangsstromen met de weerstanden *R*3 en *R*4 in figuur 361. We stellen vast: telkens wanneer we op Ta1 drukken, kipt de schakeling in de andere verzadigingstoestand - en licht al naar gelang die toestand LED1 of LED2 op. Een duidelijke zaak: de inverterende ingang is stabiel met massa verbonden. De werkelijke uitgangstoestand houdt de niet-inverterende ingang via *R*4 en *R*3 op zo'n 30 % van de bijbehorende verzadigingsspanning. Via *C*1 komt, wanneer op Ta1 wordt gedrukt, heel even de volle uitgangsspanning aan de inverterende ingang. De uitgang reageert met een omgekeerde polariteit. De parallel geschakelde condensatoren *C*2 en *C*3 geven dat - eveneens vluchtig - onmiddellijk door aan de niet-inverterende ingang. Deze ingang krijgt dus zonder vertraging de nieuwe



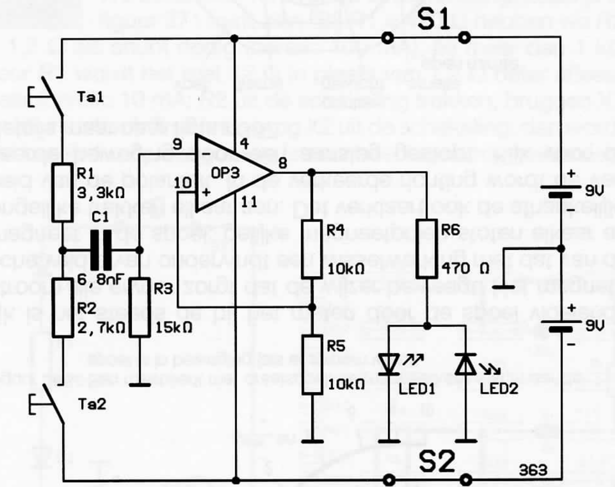
Figuur 361. Eén voor allen: bistabiel met een besturing door middel van maar één toets.



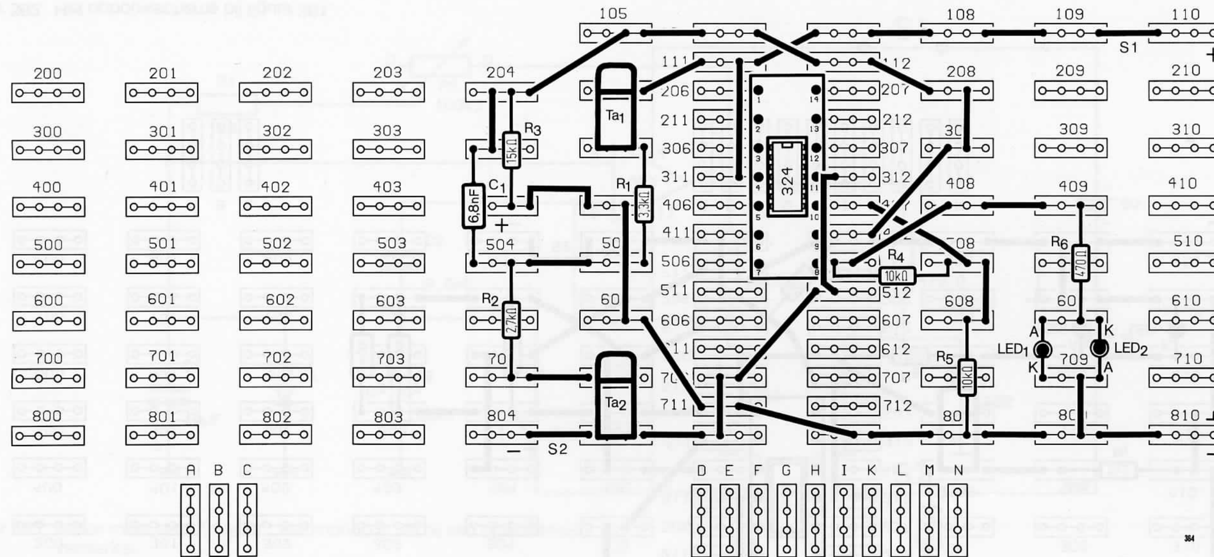
Figuur 362. Het opbouwschema bij figuur 361.

vooraf ingestelde waarde door. Het hele zaakje kipt daardoor op een volledig betrouwbare wijze in de nieuwe stabiele toestand. Wanneer nu opnieuw op Ta1 wordt gedrukt, gebeurt alles "in spiegelbeeld", want *C*1 is intussen via *R*1 en *R*2 weer ontladen en is daardoor (opnieuw) gereed voor de overdracht.

263 Haast zonder commentaar kun je nu ook begrijpen wat je aan de hand van figuur 363 kunt concluderen: omschakelen kun je uitsluitend via de bijbehorende druktoets. Licht LED1 op, een positieve verzadiging dus, dan moet je op Ta1 drukken en kipt de hele zaak naar het negatieve, en omgekeerd. Setten en resetten, de bekende RS flip-flop.



Figuur 363. Verdeling van het werk; flip-flop met een toets voor het resetten en een voor het setten.



Figuur 364. Het opbouwschema bij figuur 363.

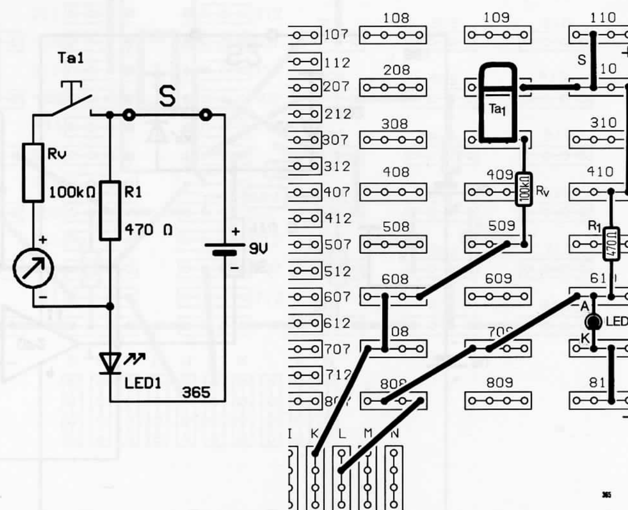
27. Meten is weten

Wat heb je aan de beste formules als je ze niet kunt toepassen en controleren? Niets toch? Dus zul je ook metingen moeten uitvoeren.

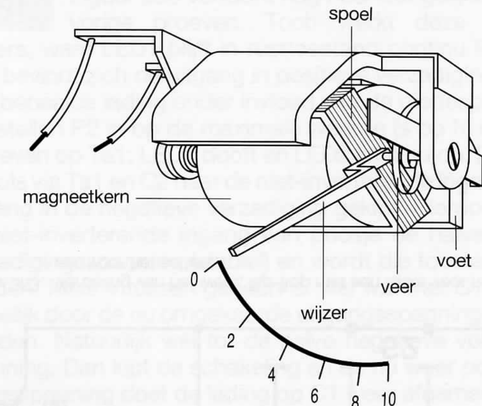
264 De schakeling die je in figuur 365 ziet, wordt ons eerste meetobject. We zullen wel voorzichtig moeten zijn, want ons meetinstrument is héél gevoelig! Zowel voor de gemeten waarden als voor de mate waarin het kan worden belast. Dus gebruiken we meestal - net als bij de licht-emitterende diode - een voorschakelweerstand. De grootte van die voorschakelweerstand hangt af van de spanning die moet worden gemeten. In figuur 365 is het een weerstand R_V van 100 kΩ. Voor gebruik van 9 volt is dat net wat we nodig hebben. Slaat de meter helemaal uit, dan betekent dat een spanning van 10 volt. Bovendien moet het instrument in de juiste richting worden aangesloten, dus plus op plus en min op min. Wanneer het maar even gaat, moet je met een druktoets werken die alleen wordt ingedrukt wanneer de eigenlijke meting wordt uitgevoerd (zie figuur 365). In de schakeling wordt over $R1$ 7 volt gemeten. Volgens de wet van Ohm vloeit dus een stroom van $I = U/R1 = 7\ \text{V}/0{,}47\ \text{k}\Omega = 14{,}9\ \text{mA}$ door LED1. Dat is een acceptabele waarde. In feite hebben we hiermee eigenlijk al beide meetmethoden leren kennen die met het instrument mogelijk zijn: de spanningsmeting en (via Ohm) de stroommeting, indirect door het meten van de spanning over een bekende weerstand.

Stroom-lijnen

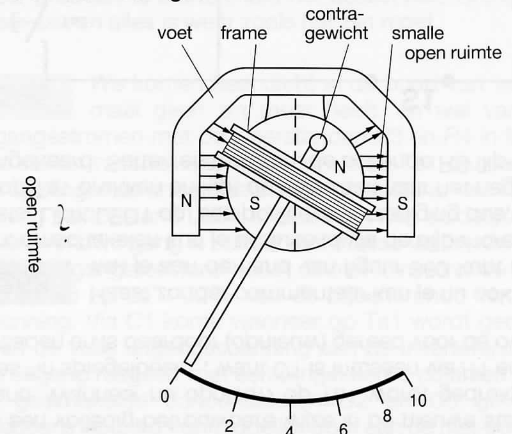
Waar een elektrische stroom vloeit, is ook een magnetisch veld. Dat gegeven is al eeuwenlang bekend. De naald van een kompas met de klos draad eromheen is eigenlijk de oervorm van de elektrische meetinstrumenten. Tegenwoordig zijn ze meestal net omgekeerd opgebouwd; kijk maar eens naar figuur 366: de kern wordt gevormd door een vaste magneet, en daaromheen bevindt zich een draaibare, gelagerde spoel. En er is een terugstelveer, die ervoor zorgt dat het gemetene ook in een bepaalde waarde kan worden aangegeven: de kracht van de magneet tegen de kracht van de veer. Uiteindelijk is het steeds de bij het meten door de spoel vloeiende stroom die ervoor zorgt dat de wijzer beweegt. Het magnetische veld ervan ondervindt een wisselwerking met dat van de magneet in de spoel: gelijke magneetpolen stoten elkaar af, ongelijke trekken elkaar aan. Dat verklaart ook de afhankelijkheid van de polariteit. In de verkeerde richting wordt de verkeerde beweging door een aanslag gestopt. Kijk voor de details maar naar figuur 367.



Figuur 365. Stroom berekenen: spanning meten over een bekende weerstand.



Figuur 366. Een meetwerk met draaispoel: de magneetkern rust, maar de spoel is in beweging (als er stroom vloeit).

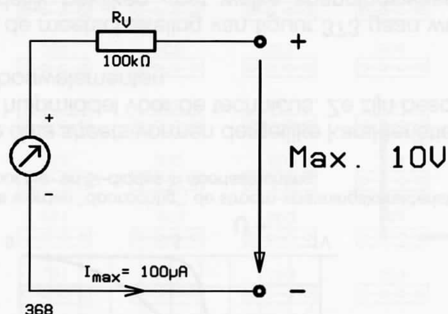


Figuur 367. Wisselwerking: een dicht veld - grote kracht.

De oorzaak van ongelijkmatige schaalverdelingen moet in de opbouw worden gezocht. De indeling kan worden aangepast aan de meest uiteenlopende taken.

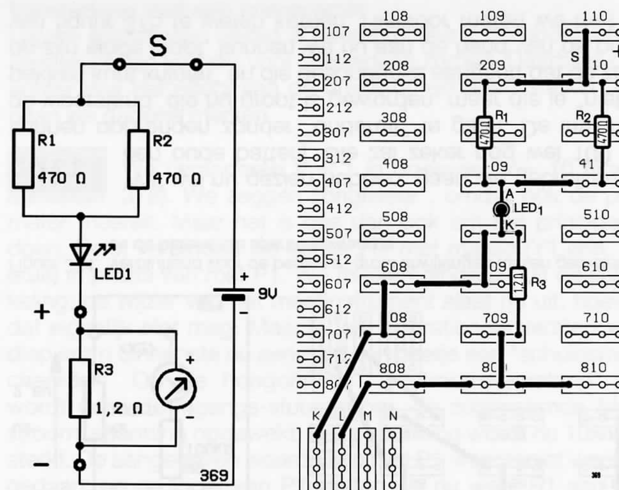
Maat-staven

De *stroom I, nodig om de wijzer van het instrument volledig te laten uitslaan*, is de belangrijkste kenmerkende grootheid van dergelijke meetinstrumenten. Door de wikkeling van het draad ontstaat er een bepaalde *inwendige weerstand* R_i. Ons meetinstrument komt tot 1200 Ω. Omdat de wijzer bij 100 µA volledig uitslaat, is er dus sprake van een *bedrijfsspanning* van 120 mV. Zonder andere schakelelementen hebben we dus naar keuze een *ampèremeter* voor ons liggen, waarvan de wijzer bij 100 µA volledig uitslaat bij een bedrijfsspanning van 120 mV, of een *voltmeter* voor 120 mV, die om volledig uit te slaan 100 µA nodig heeft. Deze stroom wordt afgenomen op de punten waarop de spanning wordt gemeten. Is er sprake van grote weerstanden in de te bemeten schakeling, dan zullen de verhoudingen dus heel duidelijk veranderen. Over deze meetfouten zullen we het later nog eens hebben. Technici rekenen vaak met het quotiënt van de inwendige weerstand en de spanning bij volledige uitslag. Bij ons is de uitkomst 1,2 kΩ/0,12 V = 10 kΩ/V. Daarmee wordt de berekening van voorschakelweerstanden voor spanningsmeetbereiken al een stuk makkelijker (zie figuur 368): voor 10 V moet het instrument met 10 V · 10 kΩ/V = 100 kΩ worden "uitgerust". Wil je het allemaal héél nauwkeurig weten: de voorschakelweerstand is precies 98,8 kΩ, want het meetinstrument zelf vormt een weerstand van 1,2 kΩ. Maar niemand zal het verschil met 100 kΩ merken.



Figuur 368. Aanpassen: de stroomsterkte bepaalt de voorschakelweerstand van de voltmeter.

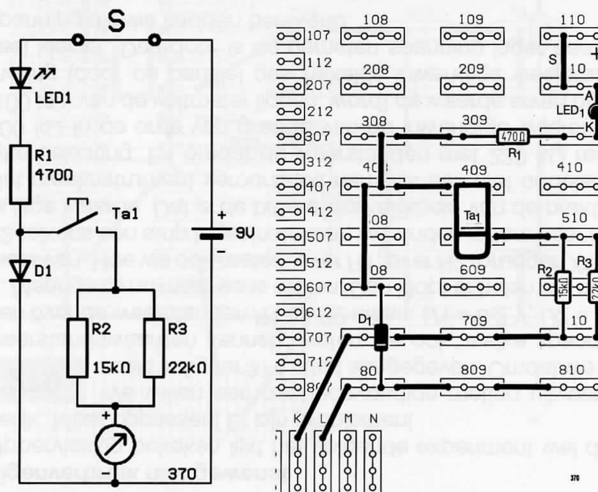
265 Met 1,2 Ω parallel aan het meetinstrument maken we een stroommeter en zetten hem in de schakeling die in figuur 369 is weergegeven. In Engeland en Amerika noemen ze de parallelle weerstand een *shunt*. In de stroomkring leidt deze weerstand alles wat het instrument niet kan opnemen, erlangs. De 120 mV bij volledige uitslag wordt bereikt wanneer er 100 mA door de shunt vloeit:
1,2 Ω . 100 mA = 120 mV.



Figuur 369. Omleiding: overtollige stroom via een sluiproute (shunt) langs de ampèremeter.

We stellen vast: wanneer de inwendige weerstand en de stroom waarbij de meter volledig uitslaat, bekend zijn, dan kan het instrument aan alle taken worden aangepast en dus zowel voor het meten van spanningen als van stroom worden gebruikt. De volgende praktische toepassingen hebben hierop betrekking.

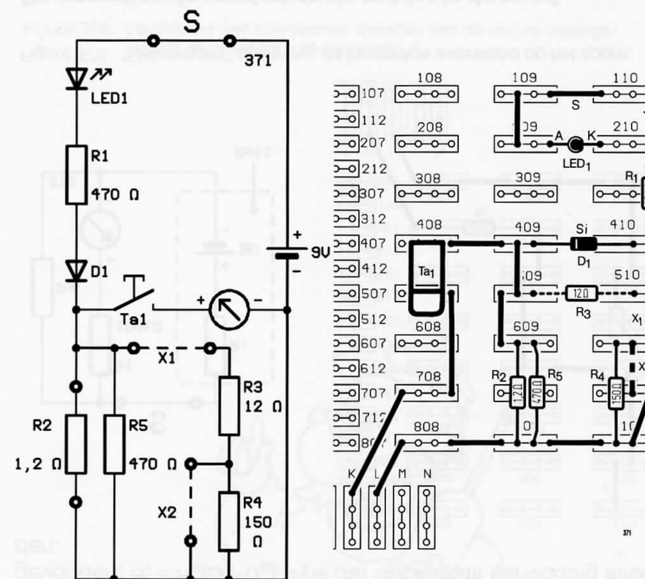
266 Met 15 kΩ en 22 kΩ parallel (figuur 370) krijg je een voltmeter die bij 1 V volledig uitslaat. De in figuur 370 gegeven praktische toepassing bestaat uit het meten van de spanningen van Ge- en Si-diodes in doorlaatrichting. **Je mag steeds pas op de druktoets drukken, wanneer de diode in de goede stand (juiste polariteit) in de veren steekt!** Dat zie je aan LED1, zij het dat bij waarden van meer dan 3,3 kΩ voor *R*1 het maar heel zwak te zien is.



Figuur 370. Spanningsmeting voor het opnemen van diodekarakteristieken: maximale uitslag bij 1 V - gebruik voor *R*1 waarden van 470 Ω tot 10 kΩ.

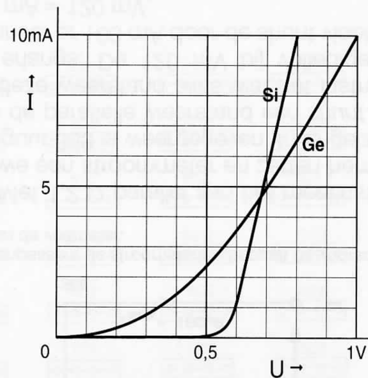
267 We gaan nu werken met grotere waarden voor *R*1 (1 kΩ, 1,5 kΩ, 2,7 kΩ, 3,3 kΩ en 5,6 kΩ) en schrijven op, hoever de meter uitslaat. Dat is steeds minder, naarmate *R*1 groter wordt!

268 We schakelen nu over op stroommeting, zoals je in figuur 371 kunt zien. Bij *R*1 = 470 Ω hebben we *R*2 = 1,2 Ω als shunt nodig (bereik: 100 mA), bij meer dan 1 kΩ voor *R*1 wordt het met 12 Ω in plaats van 1,2 Ω beter afleesbaar (bereik: 10 mA; *R*2 uit de schakeling trekken, bruggen X1 en X2 insteken). Trek je nu brug X2 uit de schakeling, dan wordt het bereik 1 mA, wat gunstig is voor heel lage stroomwaarden.



Figuur 371. Van stroom naar spanning: opnemen van de karakteristiek, deel 2. *R*1 als in figuur 370, meetweerstand te kiezen overeenkomstig de stroom (startwaarde *R*2 = 1,2 Ω voor volle uitslag 100 mA).

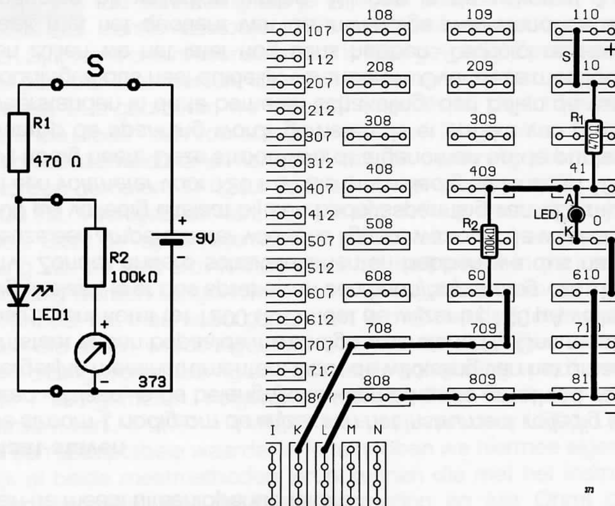
De op deze manier gevonden meetwaardeparen kunnen we op ruitjes- of millimeterpapier in een coördinatenstelsel uitzetten: de stroom als functie van de spanning. Het resultaat van onze inspanningen voor de Ge- en de Si-diode is in figuur 372 te zien. De lijnen die je ziet, zijn de *karakteristieken* voor de beide diodetypen in doorlaatrichting.



Figuur 372. Diodes worden "doorzichtig": de stroom-spanningskarakteristieken voor Ge- en Si-diodes in doorlaatrichting.

Samen met de *data sheets* vormen dergelijke karakteristieken een belangrijk hulpmiddel voor de technicus. Ze zijn beschikbaar voor alle bouwelementen.

269 Via de meetschakeling van figuur 373 gaan we nu eindelijk bekijken, met welke spanningswaarden onze licht-emitterende diodes en de IR-LED werken. Ook hiervoor zouden we een karakteristiek kunnen opnemen. Maar de "eenpunts"-metingen die bij een gewone stroom worden uitgevoerd, zeggen naar verhouding al genoeg. We zullen immers waarschijnlijk geen grote verschillen tussen de drie kleuren constateren. Maar er zijn wel rode types met een duidelijk lagere "bedrijfsspanning".



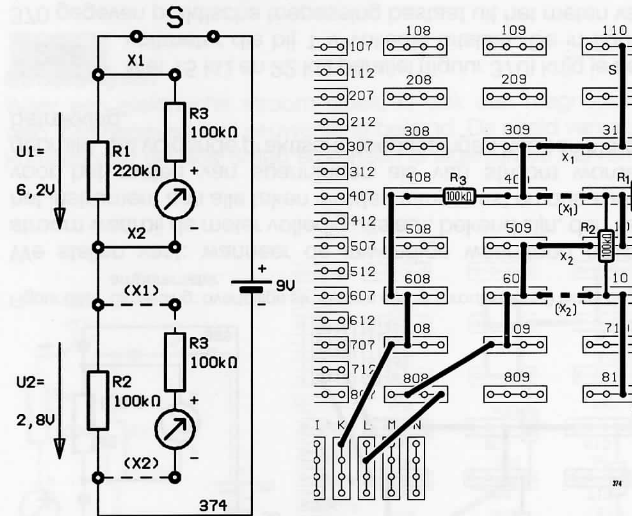
Figuur 373. Licht-emitterende diodes hebben meer spanning nodig: meting van de kleurafhankelijke LED-spanning (volle uitslag bij 10 V).

Ook de waarde voor de infrarood-zenddiode ligt nogal laag. Die waarde gaan we je nu eens niet verraden - die moet je maar zelf meten!

Eigenverbruik niet gewenst

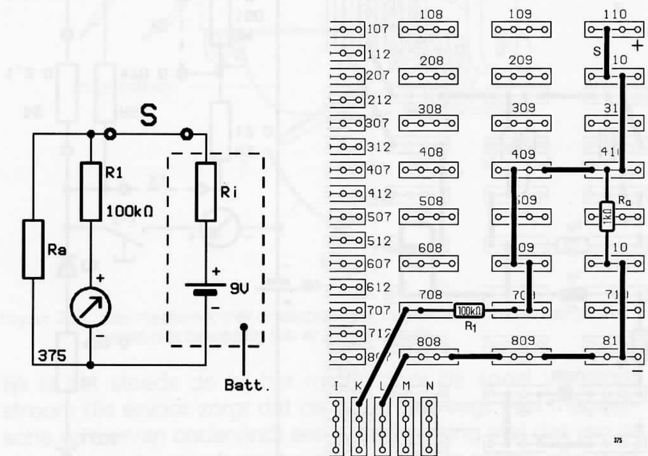
Oppervlakkig bekeken lijkt het volgende experiment wel duidelijk. Maar oppassen! Er zijn problemen!

270 We willen een heel eenvoudige meting uitvoeren zoals in figuur 374 staat aangegeven. Omdat we de weerstandswaarden kennen, weten we ook, welke spanningen over de weerstanden *R*1 en *R*2 staan: *U*1 = 6,2 V; *U*2 = 2,8 V. Maar ga ze nu maar eens meten. Dan klopt er helemaal niets meer van. Hoe we ook meten, over *R*1, over *R*2 (bruggen X1 en X2 telkens een strip lager insteken), we vinden iedere keer een te lage waarde. Dat is de bittere werkelijkheid van de praktijk. Het meetinstrument veroorzaakt namelijk een niet onbelangrijke belasting. En omdat de weerstanden met 220 kΩ resp. 100 kΩ in de orde van grootte van de inwendige weerstand (100 kΩ) van de voltmeter liggen, wordt de waarde ervan bij de meting (door de parallel geschakelde inwendige weerstand) veel kleiner. Daardoor is de gemeten spanning lager dan de spanning die we hadden berekend.



Figuur 374. Verbluffend voor de beginner: grote afwijkingen tussen gemeten en de berekende spanningswaarde.

271 Wat we nu gezien hebben, gaan we gebruiken bij een oude batterij. Die zal zeker nog wel 100 µA kunnen opbrengen zonder "onderuit" te gaan. De inwendige weerstand, die nu groot is geworden, maar die je "niet te pakken kunt krijgen" en die desondanks aangeeft dat de zaak op zijn einde loopt, kunnen we nu aan de hand van de proef van figuur 375 te weten komen. Hiervoor meten we met de voltmeter (bereik 10 V) de batterijspanning eerst zonder belasting (U_l, nullastspanning). Vervolgens belasten we na elkaar met R_a = 1 kΩ, 470 Ω etc., totdat we uiteindelijk bij een belasting van 12 Ω (kortstondig) komen. Bij deze volgorde wordt een steeds lagere spanning aangegeven. Misschien komen we hierbij wel toevallig een uitwendige weerstand tegen, waarbij de halve nullastspanning ontstaat. Dat zou dan precies de waarde van de "onzichtbare" zijn: de spanningsdeling 1 : 1. Maar ook met andere waarden voor de uitwendige weerstand R_a en de aangegeven spanning U_a kan deze waarde worden gevonden: $R_i = R_a(U_l - U_a)$. Wie dat wil, kan dit eenvoudig afleiden.

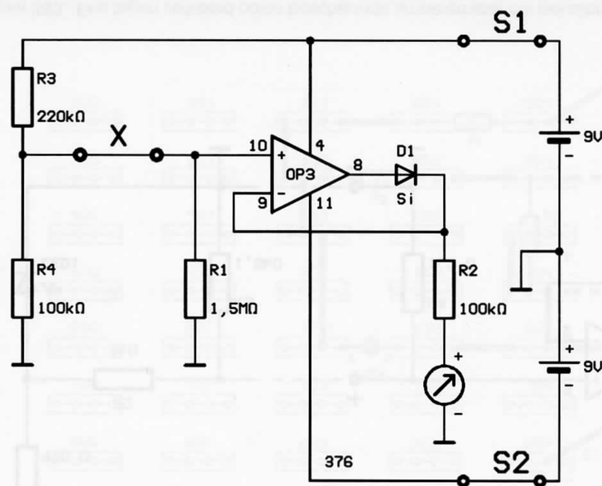


Figuur 375. "Gekrompen" spanning: de inwendige weerstand op het spoor.

De operationele versterker als redder in de nood

Een lage uitgangsweerstand en een slechts van de "lekstroomweerstand" voor de ingangsstroom afhankelijke (hoge) ingangsweerstand - wat was dat ook al weer? Juist, een niet-inverterende operationele versterker. Belangrijk is de hoge ingangsweerstand. Hij hoeft niet te versterken. Dus nemen we de één-versterker". Het resultaat is:

272 We bouwen in een mum van tijd een hoogohmige voltmeter op zoals in figuur 376 is aangegeven, en wel eerst nog zonder de brug X. De diode zorgt voor de juiste polariteit. De maximaal mogelijke ingangsspanning is dan ook beperkt tot de verzadigingsspanning in positieve richting min de spanning over de diode. Je moet dus niet raar opkijken wanneer hierdoor 9 V niet wordt aangegeven! Doe nu de proef met de spanningsdeler zoals die in figuur 374 staat aangegeven (brug X aanbrengen): het meetresultaat zal nu dicht in de buurt liggen van de rekenkundige waarde voor de onbelaste spanningsdeler. De ingangsweerstand van onze voltmeter is nu namelijk zo'n 15 keer zo groot als bij experiment 270.

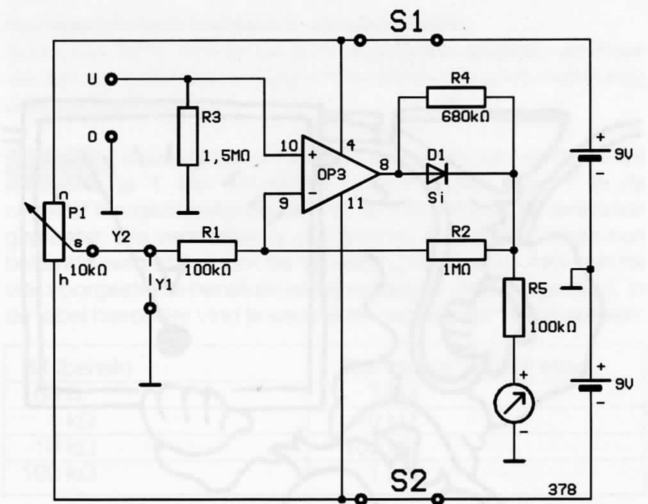


Figuur 376. Voldoende beschermd, ook tegen verkeerd polen: een operationele versterker helpt bij spanning meten.

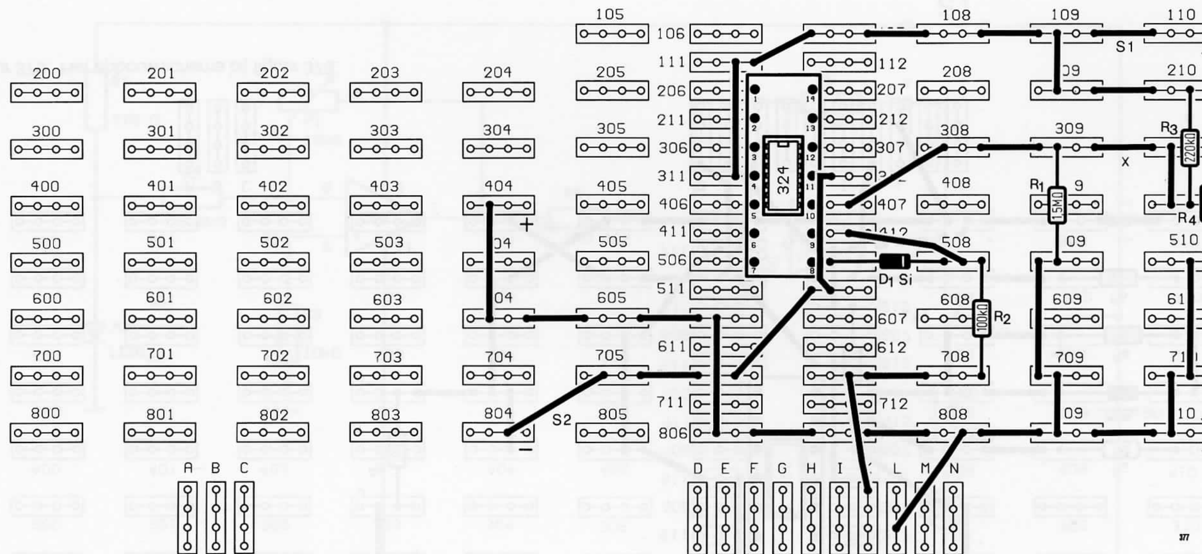
Versterking met een compromis

Lagere spanningen meten is geen probleem. De operationele versterker kan immers voor versterking zorgen. Daarbij is dan echter ook het effect van de onvolkomenheden sterker. Dat gaan we dadelijk merken.

273 We veranderen V = 1 in ongeveer V ≈ 10 (figuur 378). We zeggen "ongeveer", omdat ook de potmeter meetelt. Maar het is ons dan ook om het principe te doen. Eerst verbinden we echter *R*1 met massa (Y1 erin, Y2 eruit) in plaats van met P1. We trekken diode D1 uit de schakeling; de wijzer van het meetinstrument slaat nu uit, hoewel dat eigenlijk niet mag. Maar iedere operationele versterker is diep in z'n binnenste nu eenmaal een beetje een "schuinsmarcheerder". Op de hoogohmige "lekstroomweerstand" *R*3 wordt door de ingangs-stuurstroom, de zogenaamde *biasstroom*, spanning opgewekt. Deze spanning wordt nu 10x versterkt. De aangegeven waarde kan met P1 weer teniet worden gedaan; op de loper van P1 sluiten we nu weer *R*1 aan (Y1 eruit, Y2 erin). P1 hoeft maar een heel klein beetje uit de middenpositie te worden gedraaid. Na het instellen van de nulwaarde en het insteken van D1 kan de voltmeter worden gebruikt.



Figuur 378. Versterking met compromis: instellen van de van de ingangsstroom afhankelijke fout-spanning.



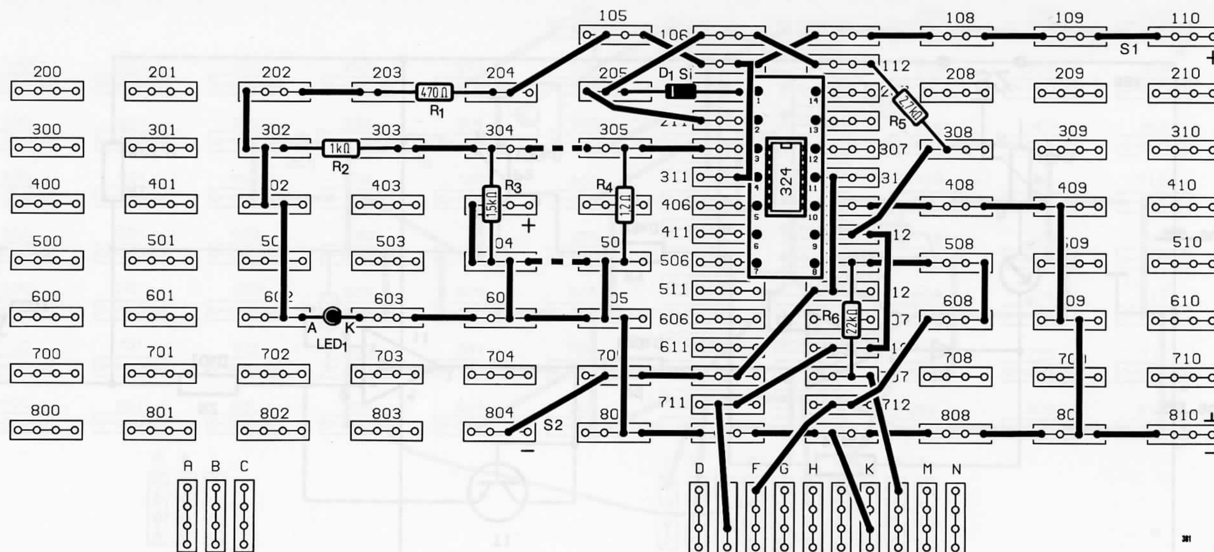
Figuur 377. Het opbouwschema bij figuur 376.



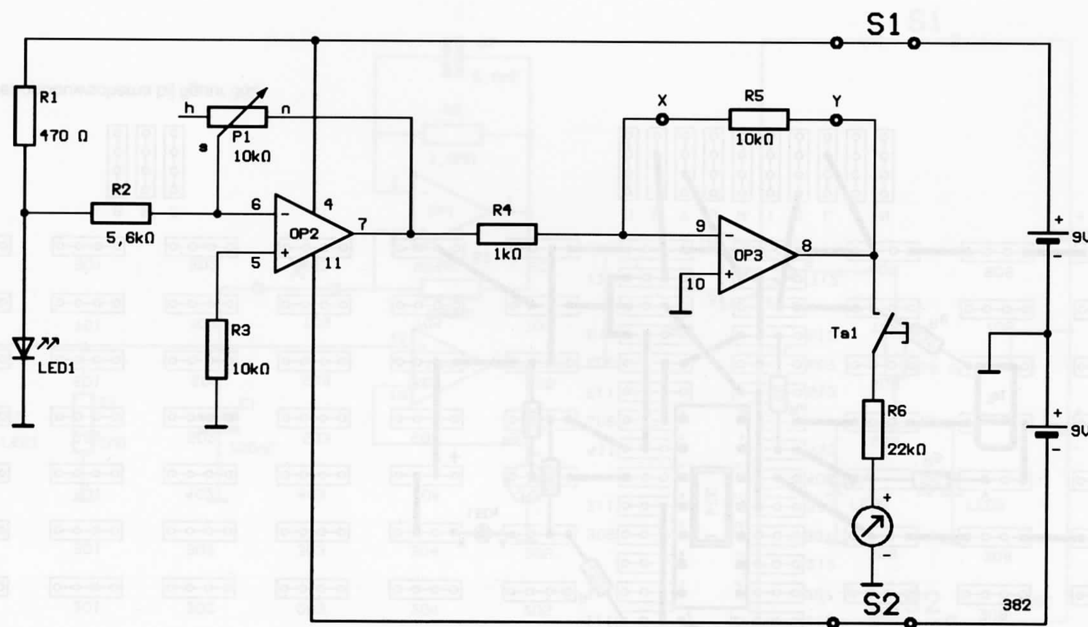
Figuur 379. Het opbouwschema bij figuur 378.

Figuur 380. Een tegen verkeerd polen beschermde ampèremeter die gekalibreerd kan worden: een stabiele spanning van 1,2 V simuleert een stroom van 1 A.

274 De schakeling van figuur 380 scheidt de meettak van de rest van de schakeling, beschermt tegen verkeerd aansluiten en maakt het via P1 mogelijk om vrijelijk het bereik te kiezen zonder dat je de "stroomvoeler" *R*4 moet veranderen. Bovendien kunnen we de schakeling met behulp van de hulpschakeling links in de figuur instellen op het meetbereik voor 1 A (eindwaarde), zonder dat er een stroom van 1 A moet vloeien. Hiervoor trekken we *R*4 uit de schakeling en maken de met een stippellijn aangegeven verbindingen. Daarmee komt er een spanning van 1,2 V op de schakeling te staan - net zoveel als 1 A via *R*4 teweeg zou brengen.



Figuur 381. Het opbouwschema bij figuur 380.



Figuur 382. Ontmaskert weerstanden: een inverterende versterker als ohm-meter. Voor de meetbereiken zie de tabel.

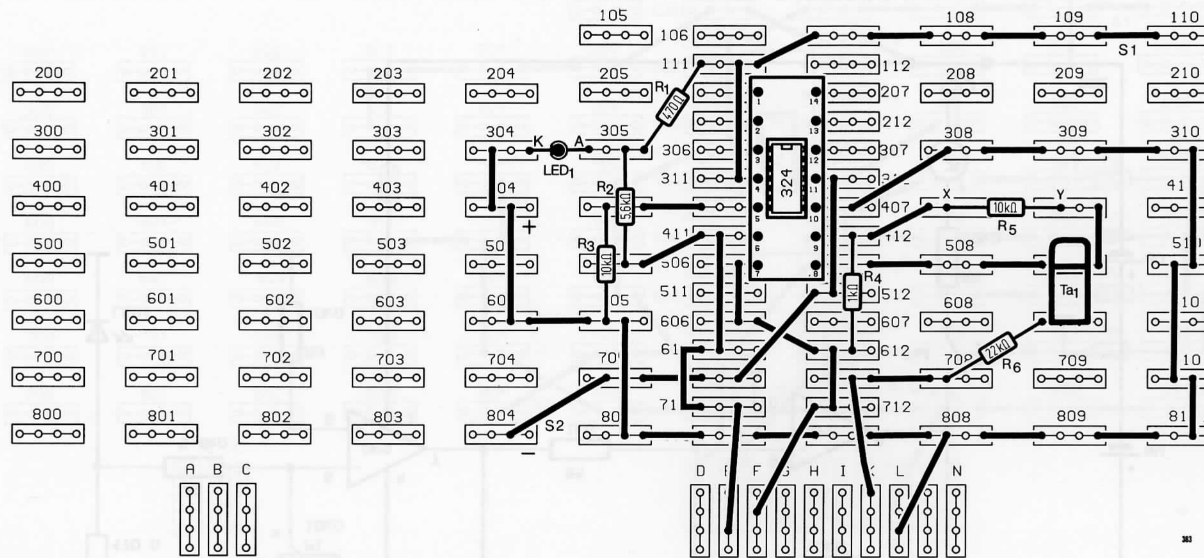
De operationele versterker als ohm-meter

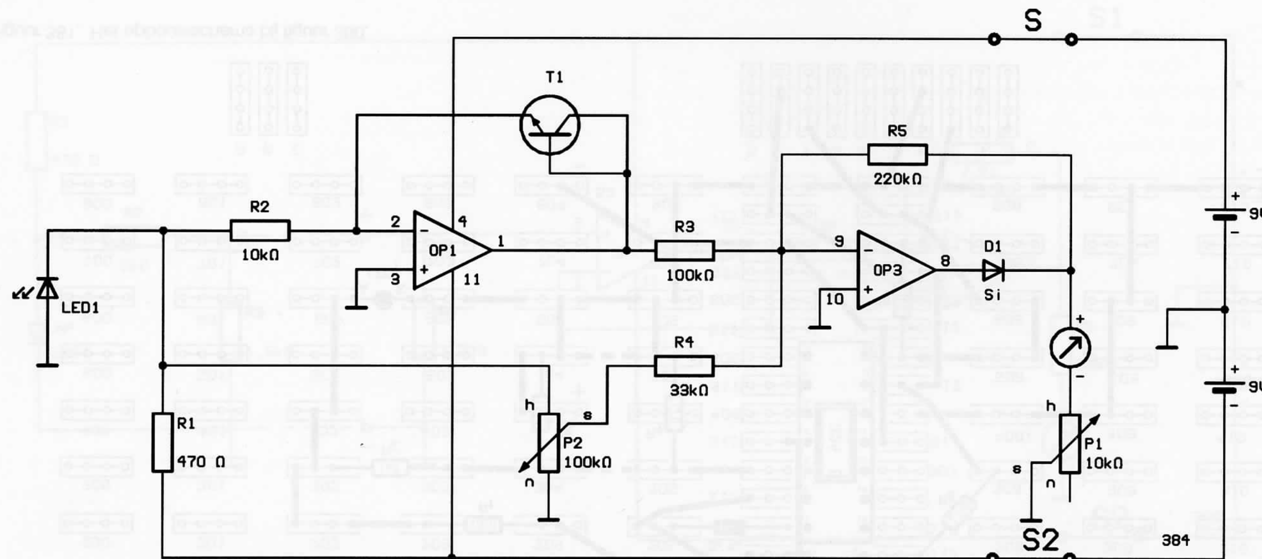
Soms kan de op een weerstand aangegeven waarde niet meer worden ontcijferd. In zo'n geval kan alleen een ohm-meter nog uitkomst bieden.

275 Bouw de schakeling van figuur 382 op, en dan weet je 't. De "kandidaat" wordt tussen X en Y in de negatief terugkoppelende tak van een inverterende versterker geplaatst. Die versterker is van tevoren aan de hand van een bekende weerstand van de vereiste grootte voor één van de vier voorgestelde bereiken en bij volledige uitslag ingesteld. In de tabel hieronder vind je waar je de "kandidaat" moet zoeken:

R4 (bereik)	"kandidaat" R5 tot max.
100 Ω	1 kΩ
1 kΩ	10 kΩ
10 kΩ	100 kΩ
100 kΩ	1 MΩ

De effectieve versterking van maximaal 10 wordt dus bepaald door de kandidaat. Het meetinstrument met de voorschakelweerstand en de op de LED1 opgewekte constante spanning kunnen met behulp van de versterking van de eerste operationele versterker makkelijk worden aangepast. Een voorbeeld: *R4* = 1 kΩ, *R5* = 10 kΩ (hier wordt naderhand de kandidaat voor gebruikt). P1 moet in de middenpositie staan, en dan moet je op Ta1 drukken en P1 vervolgens zó corrigeren dat het meetinstrument volle uitslag vertoont. En dat is alles. Je kunt nu gaan meten!


Figuur 383. Het opbouwschema bij figuur 382.

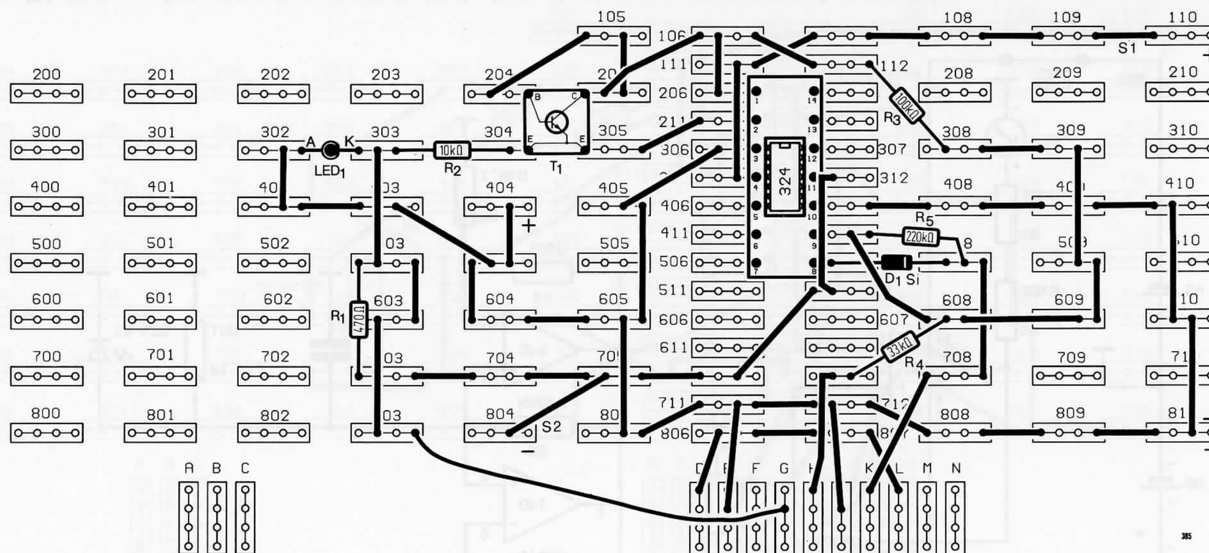

Figuur 384. Operationele versterkers doen het hem: temperatuurafhankelijke pn-spanning te gebruiken als thermometer.

Een thermometer voor milieu-engeltjes

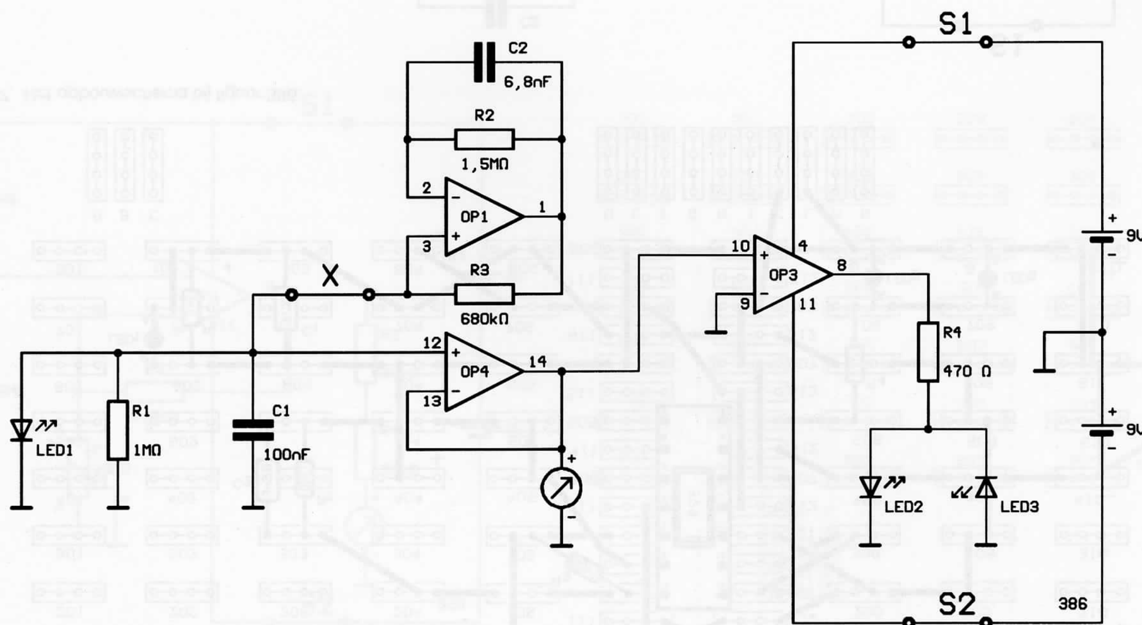
Zonder kwik gaat het met behulp van een pn-overgang. Laten we eens rekenen met -2,4 mV/K. Dat is de temperatuurafhankelijke verandering van de spanning op een pn-overgang bij een constante stroomtoevoer van 200 µA. De basis-emitter-spanning van een Si-transistor uit onze experimenteerdoos ligt bij 0 °C ongeveer bij 630 mV. Bij een temperatuur van 100 °C is het waarschijnlijk nog zo'n 390 mV.

276 Laten we nu daarmee eens een thermometer gaan bouwen, aan de hand van figuur 384. Als referentie voor 0 graden gebruiken we een waterdichte plastic zak met smeltende ijsblokjes erin. Vooraf moeten we P2 instellen op ongeveer 10 % boven de aanslag n en P1 op 50 %. Wanneer T1 de temperatuur heeft van het smeltwater, moet je de wijzer met behulp van P2 op nul stellen. Vervolgens moet aan de hand van een gewone thermometer bij een willekeurig hogere temperatuur (die wel lager moet zijn dan 100 graden Celsius!) met P1 de bijbehorende uitslag worden ingesteld.

Werking: 2 V van LED 1 resulteren in 200 µA door *R*2. Deze stroom vloeit ook van de uitgang door T1 en resulteert tussen de uitgang en het knooppunt aan de inverterende ingang in de temperatuurafhankelijke spanning - bijv. 630 mV bij 0 °C. Zonder de tak met *R*4 wordt deze spanning door de tweede operationele versterker vanwege *R*5/*R*3 zo'n 2,2 keer, dus tot ongeveer 1,4 V, versterkt. Maar wanneer we met P2 een dusdanige spanning voor *R*4 instellen dat bij precies 0 °C de door *R*3 naar het knooppunt aan de inverterende ingang vloeiende stroom weer wordt afgeleid, dan wordt de uitgang achter D1 op 0 V gehouden (de polariteit van P2 is immers negatief en die van *R*3 positief). Stijgt de temperatuur, dan klemt de stroom door *R*3 af. Ten opzichte van de (constante) stroom door *R*4 ontstaat een met de temperatuur toenemend verschil, en de uitgangsspanning wordt hoger. (Nu moet de uitgang via *R*5 voor de "ontbrekende" stroom door *R*3 naar het knooppunt zorgen.)



Figuur 385. Het opbouwschema bij figuur 384.



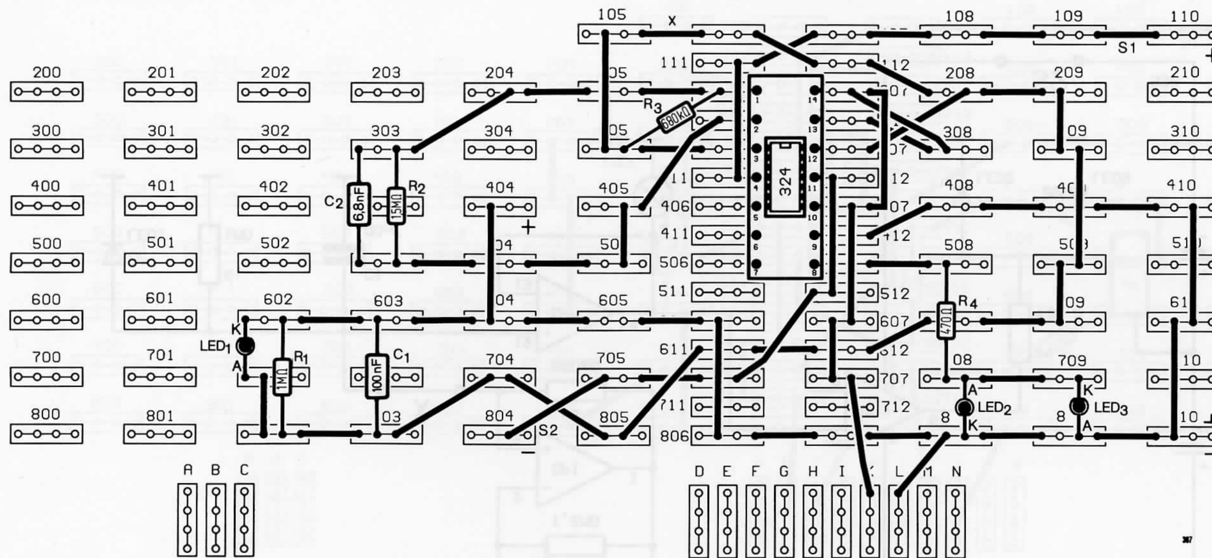
Figuur 386. Gevoeliger door compensatie: de operationele versterker leidt de ongewenste ingangsstroom (bias-stroom) van de versterker af van de meetsonde.

Wie het kleine niet eert...

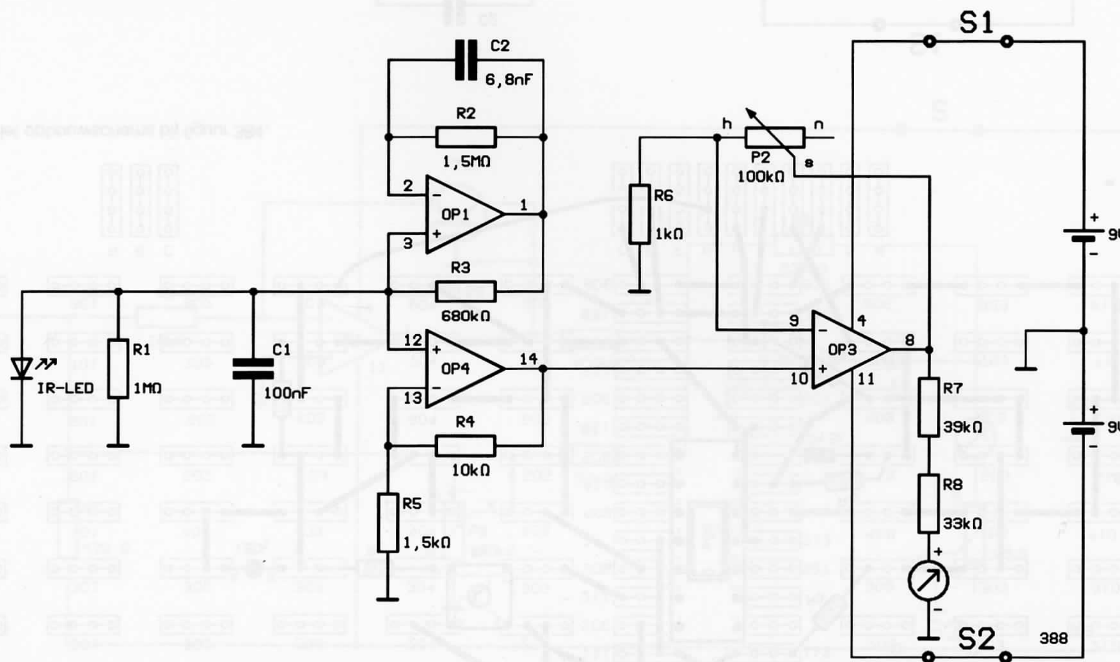
De vier operationele versterker-elementen op de chip van onze schakeling hebben naar alle waarschijnlijkheid vrijwel identieke eigenschappen, zodat dus ook vrijwel dezelfde bias-stromen uit de ingangen vloeien. Voor hen zijn 50 nA (nano-ampère, dus miljardste ampère) al een hoge waarde. Bij 1 MΩ betekent dat al niet minder dan 50 mV spanningsval. Bij de schakeling zoals die in figuur 386 staat aangegeven gaat het om even kleine signaalspanningen. De ingangsstroom stoort dus wel bijzonder. Maar we hebben nog een trucje om het effect ervan te compenseren.

277 Hiervoor bouwen we de testschakeling op overeenkomstig figuur 386. Verbinding X blijft eerst nog even open en de wijzer van het meetinstrument slaat uit. Breng nu brug X aan; de wijzer slaat nu al een stuk minder uit. In het gunstigste geval staat hij op 0. Dat werkt zo:

De bovenste operationele versterker wordt voor compensatie gebruikt. Vanwege de verhouding tussen de waarden van *R*2 en *R*3 moet de stroom die door *R*3 vloeit, ongeveer tweemaal zo groot zijn als die door *R*2. Wat daarbij aan de bovenste operationele versterker ontbreekt is precies de bias-stroom van de onderste. In het knooppunt dat door de beide niet-inverterende ingangen en *R*3 wordt gevormd, vloeien uit de ingangen stromen die vrijwel precies de grootte van de stroom hebben die door *R*3 vloeit - daardoor wordt de signaalbron ontlast. De rechterzijde van de testschakeling is overigens slechts een gevoelige "extra indicator" zoals we die al kennen.



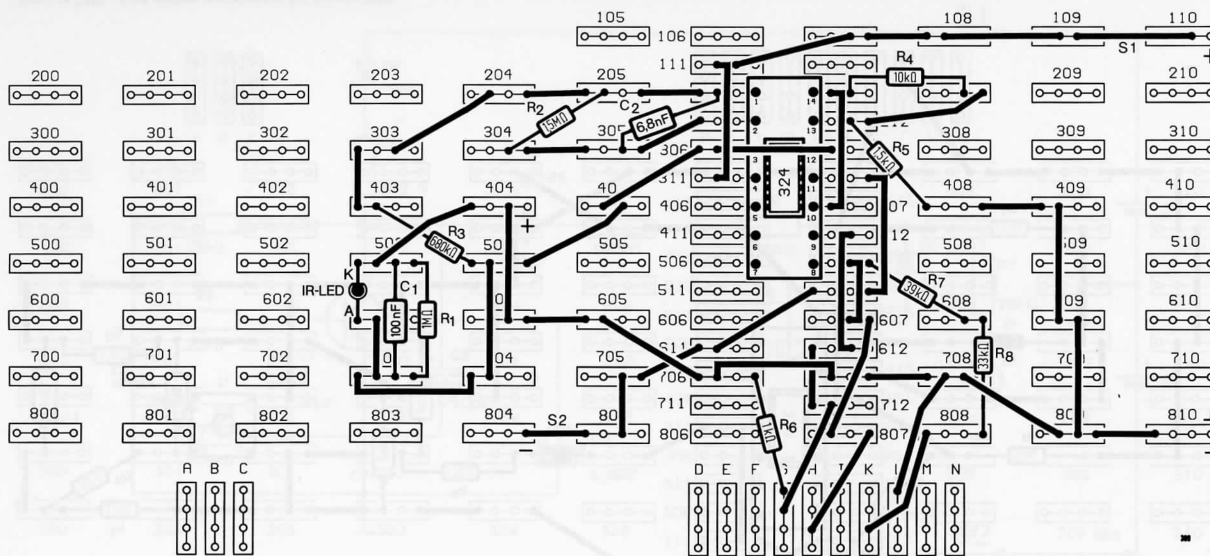
Figuur 387. Het opbouwschema bij figuur 386.



Figuur 388. Meting van licht met behulp van een IR-zenddiode: de bias-stroomcompensatie zorgt voor zuivere verhoudingen.

278 Als “thematisch vervolg” op de proef die we zojuist hebben uitgevoerd, bouwen we nu de schakeling op zoals in figuur 388 staat aangegeven. De signaalbron is de IR-LED. Maar die houden we voorlopig nog even buiten het gebeuren. Het instrument mag haast geen uitslag vertonen. Het bevindt zich nu achter twee versterkers, waarvan de eerste voor een ongeveer 6,7-voudige versterking zorgt. De versterking van de tweede wordt met behulp van P2 aangepast aan de behoefte. Voor dit doel moet je de inmiddels ingestoken IR-LED blootstellen aan het helderste licht dat je in je kamer hebt. Die lichtsterkte geldt nu als maximale waarde, en vervolgens wordt met P2 aangepast. Nu kun je andere plekken in huis gaan vergelijken met de gevonden waarde. Doe maar eens een paar lampen aan en weer uit en registreer de verschillen. Het meten van licht is een héél omvangrijk terrein ...



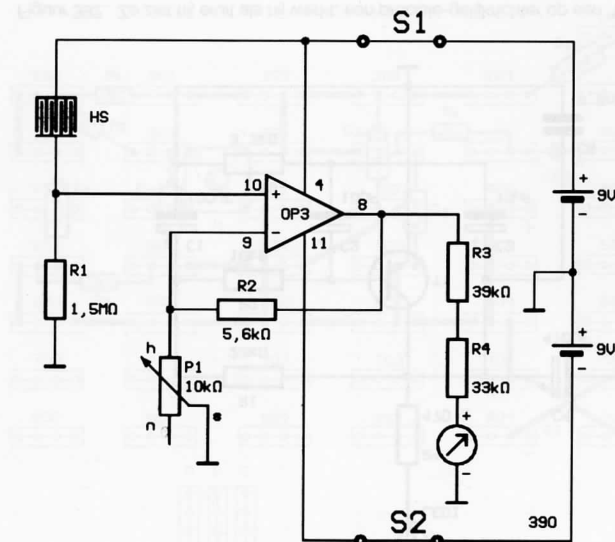


Figuur 389. Het opbouwschema bij figuur 388.

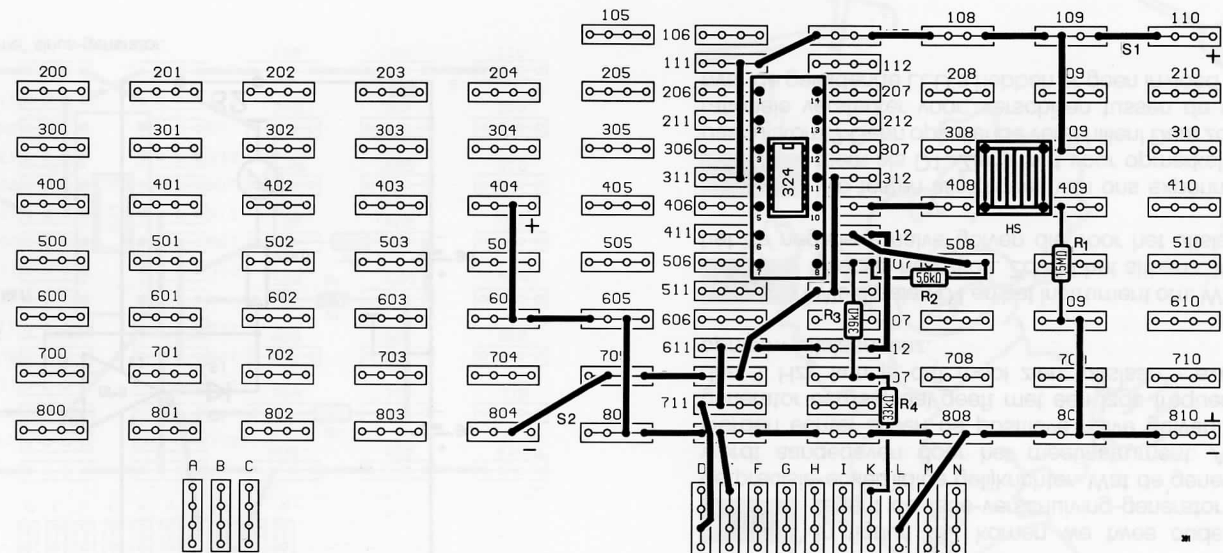
Een hygrometer met operationele versterker

Met het laagje keukenzout eroverheen ziet onze hygro-sensor (HS) er niet meer echt nieuw uit. Maar hij doet het nog steeds.

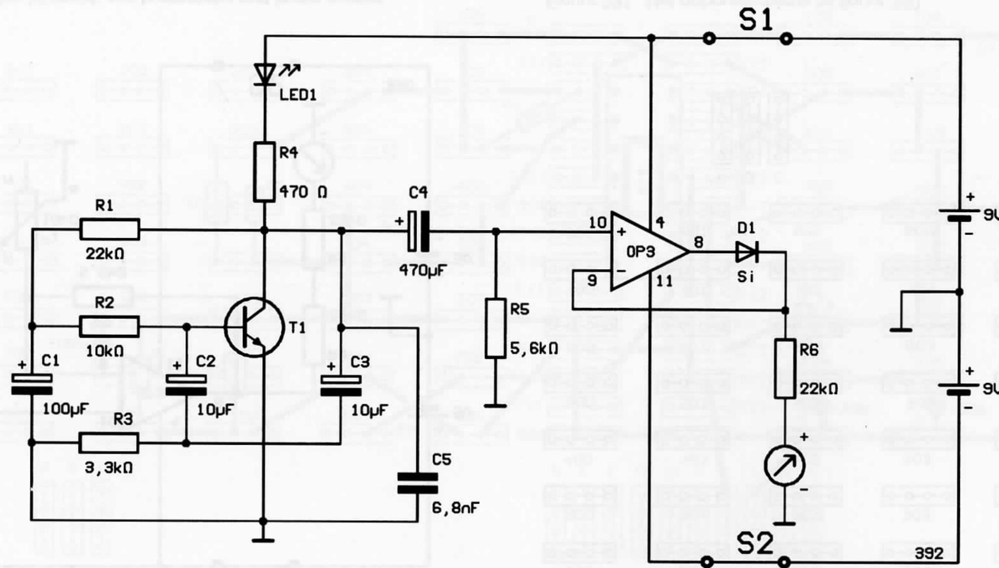
279 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 390 bepaalt P1 de versterking. We stellen P1 in het midden van zijn bereik en ademen dan stevig tegen de sensor. We kunnen dan, binnen een acceptabel bereik, de verschillen in de luchtvochtigheid bekijken en nagaan hoe we ons bij die waarden voelen. Iets om te gebruiken in een fitnessruimte?



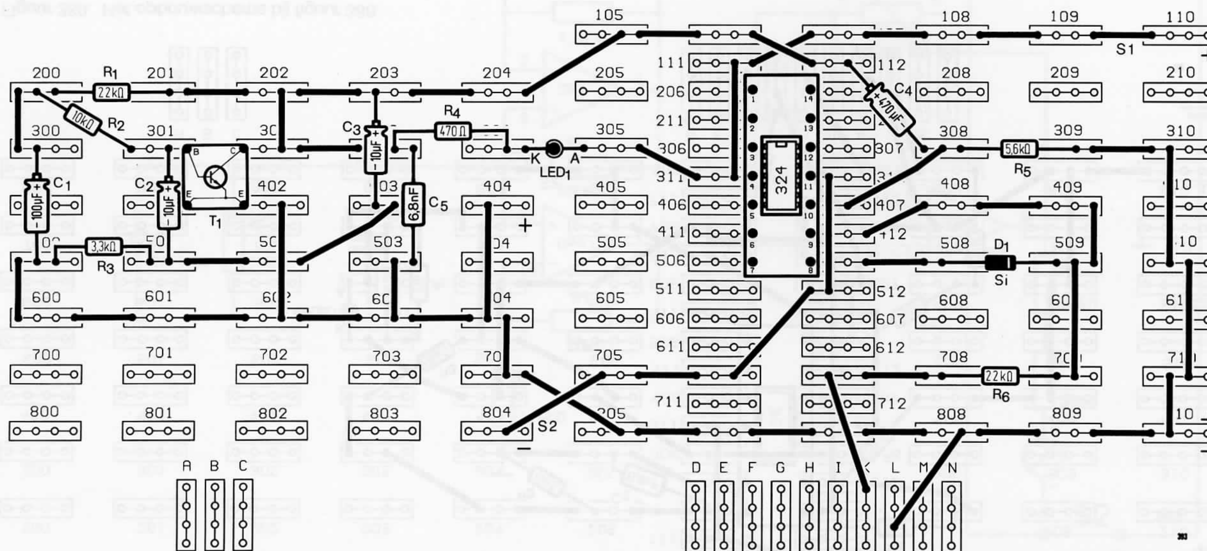
Figuur 390. Uitslag bij vocht: een hygrometer met hygro-sensor.



Figuur 391. Het opbouwschema bij figuur 390.



Figuur 392. Zo ziet hij eruit als hij werkt: een precisie-gelijkrichter op een "langzame" sinus-generator.



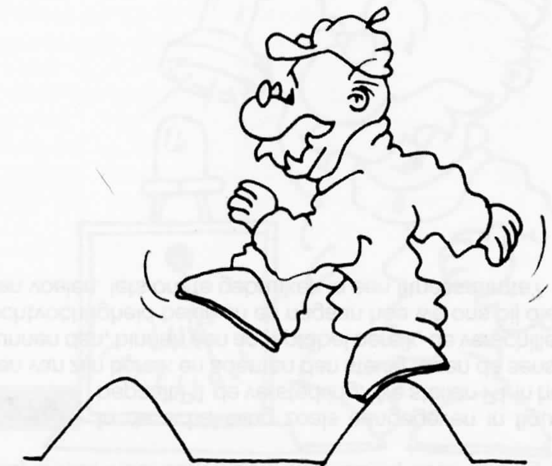
Figuur 393. Het opbouwschema bij figuur 392.

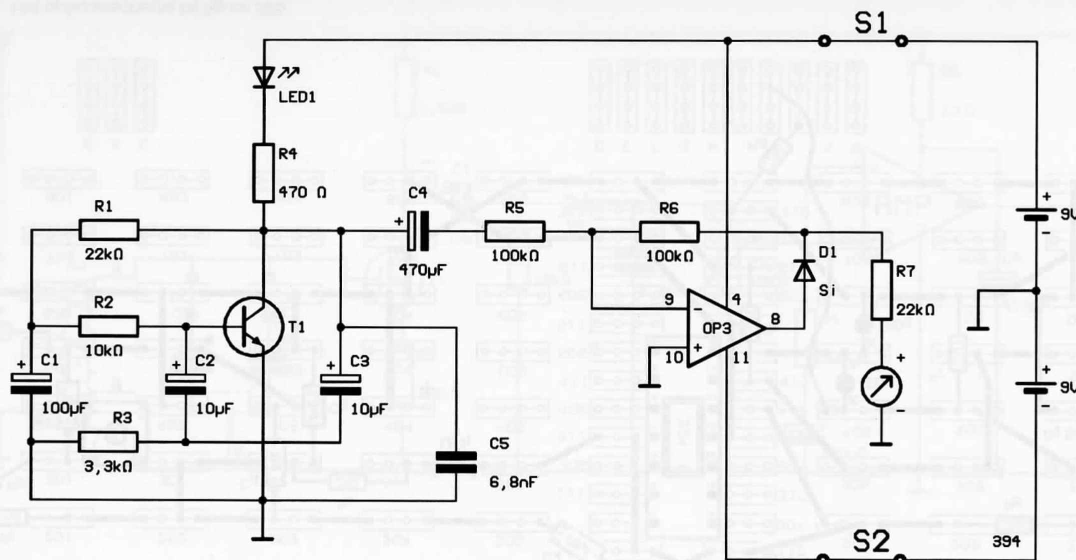
Blikken (af-)wisselen
Wat nu komt is bijna allemaal al eens eerder gebeurd. Het moet dan ook steeds makkelijker te begrijpen zijn.

280 In figuur 392 komen we twee oude bekenden tegen: de fase-verschuiving-generator (sinus!) en de precisie-enkelzijdige gelijkrichter. Wat de generator levert, wordt aangegeven door het meetinstrument. Aangegeven worden echter alleen de positieve halve golven. Omdat de generator een signaal geeft met een lage frequentie (kleiner dan 1 Hz), kun je dat mooi zien: uitslaan - even pauze - opnieuw uitslaan, enz.

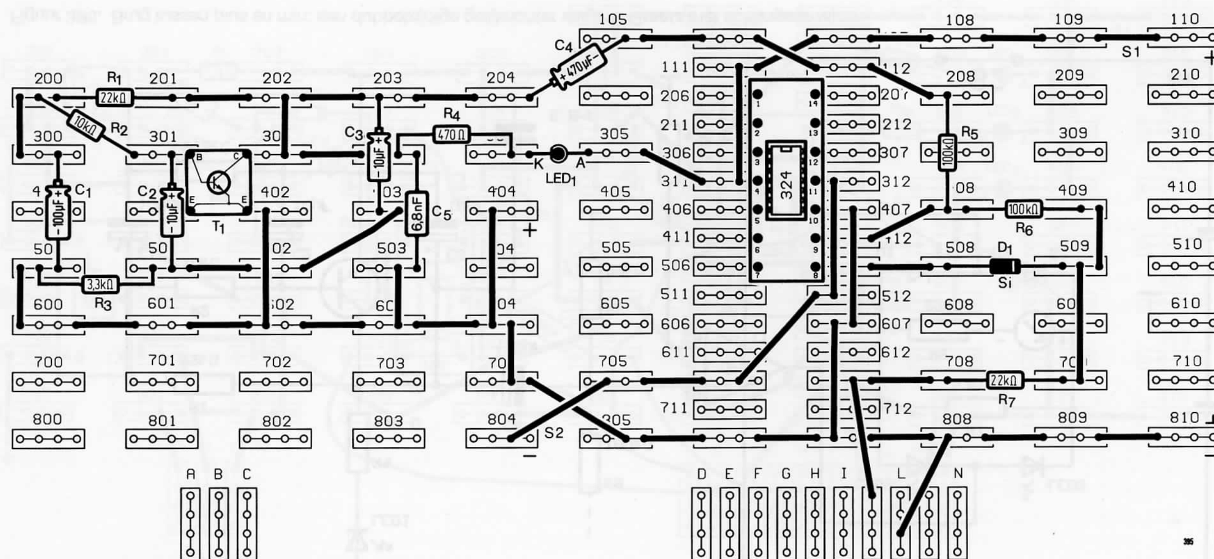
281 We draaien D1 en het instrument om. Wat zie je nu? Precies hetzelfde. Zo lijkt het althans. Want nu zijn het de negatieve halve golven die voor het uitslaan zorgen.

282 We testen alle diodes van ons experimenteersysteem als D1. Zie je wat voor opmerkelijk resultaat daar uitkomt? Geen opvallende verschillen! Daar zorgt de operationele versterker voor; verschillen tussen de spanningen over de geleidende LED's hebben er geen invloed op.



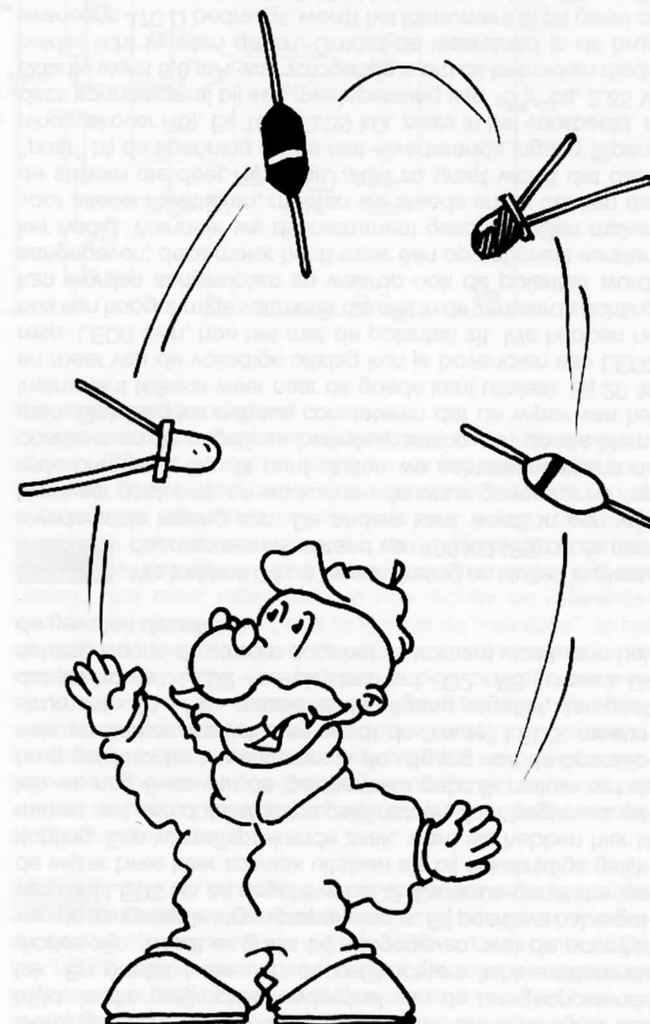


Figuur 394. Draaien levert niets nieuws op: ook in inverse modi vindt gelijkrichting plaats.



Figuur 395. Het opbouwschema bij figuur 394.

283 Met de test zoals aangegeven in 394 kunnen we ons ervan overtuigen dat zo'n gelijkrichter ook met een inverterende versterker kan werken. Als je zin hebt, kun je dat nog eens met alle diodes uittesten.





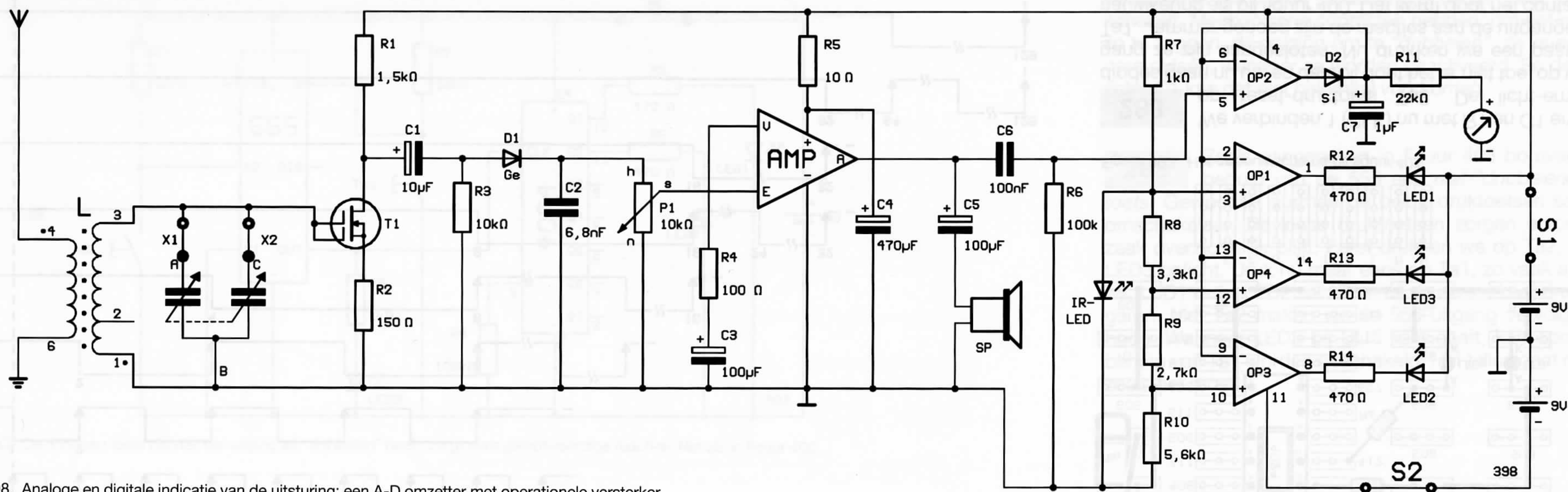
Figuur 396. Brug tussen plus en min: een dubbelzijdige gelijkrichter volgens Graetz met richtingaanwijzer



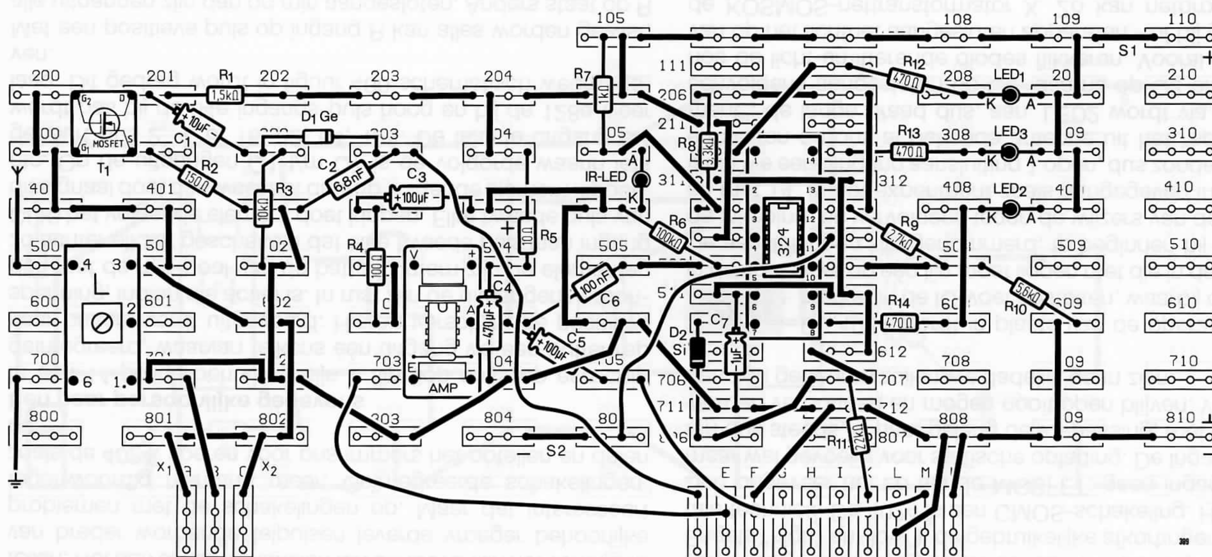
Figuur 397. Het opbouwschema bij figuur 396.

284 Gelijkrichten via een operationele versterker wordt pas echt een "afgeronde" zaak wanneer gebruik wordt gemaakt van een brug-gelijkrichter. Zoals uit figuur 396 blijkt, is die gelijkrichter onderdeel van de terugkoppelende tak. En omdat twee van de gelijkrichters licht-emitterende diodes zijn, wordt er gratis bij aangegeven, wat de polariteit van de aangelegde ingangsspanning is. Bij positieve halve golven licht LED3 op, bij negatieve LED2. De sinus-generator laat de wijzer twee keer zo vaak uitslaan als bij enkelzijdige gelijkrichting. Een vanzelfsprekende zaak, want we hebben hier te maken met een *dubbelzijdige gelijkrichter*. Voor beginners willen we nog even van de gelegenheid gebruik maken om de brug-gelijkrichter te verklaren: is de uitgang van de operationele versterker positief, dan wordt de "route" LED3, meetinstrument - D1 - *R6* - massa. Is de uitgang negatief, dan geeft dat als "route": LED2 - meetinstrument - D2 - *R6* - massa. De richting waarin de stroom door het instrument vloeit, is in beide gevallen dezelfde!

285 We trekken *C4* uit de schakeling en sluiten in plaats daarvan een weerstand van 100 kΩ (*R9*) op de niet-inverterende ingang aan. De andere kant wordt in een vrije klemveer gestoken, en we kunnen de sinus-generator nu "op orde brengen". Op dit punt sluiten we achtereenvolgens de positieve en de negatieve bedrijfsspanning aan op die klemmen. Gelukkig kunnen we constateren dat de wijzer van het instrument telkens weer naar de goede kant uitslaat. Bij 20 % en meer van de volledige uitslag kun je bovendien aan LED2 resp. LED3 zien, hoe het met de polariteit zit. We hebben nu dus een hoogohmige voltmeter die niet in de verkeerde richting kan worden aangesloten en waarop ook de polariteit wordt aangegeven; deze meter heeft maar één operationele versterker nodig. Wanneer we dit instrument geschikt willen maken voor allerlei meettaken, moeten we steeds eraan denken dat de stroom die door *R6* vloeit, altijd zó groot wordt dat deze "past" bij de spanning op de niet-inverterende ingang (Spanningsval over *R6*). Bij 100 kΩ/39 kΩ, zoals in het voorbeeld, is deze spanningsval bij een meetspanning van 10 V, ca. 2,85 V. Daarbij vloeit 6,8 mA, wat voldoende is om de betrokken diode helder licht te laten geven. Omdat de weerstand in de brug eveneens 470 Ω bedraagt, wordt het instrument in dit geval zó ingesteld dat de wijzer bij 2,85 V helemaal uitslaat (*R8* ca. 27 kΩ).



Figuur 398. Analoge en digitale indicatie van de uitsturing: een A-D omzetter met operationele versterker.



Figuur 399. Het opbouwschema bij figuur 398.

Van analoog naar digitaal

Op een meetinstrument met wijzer kun je iedere tussenwaarde aflezen. Of zo'n waarde nu klopt (en we het nauwkeurig kunnen zien) of niet, dat kunnen we controleren met behulp van schakelingen van het ja-nee type. Al naar gelang de vooraf ingestelde referentiespanning, d.i. de vastliggende spanning die voor de vergelijking wordt gebruikt, volgt er al dan niet een uitslag. Hoe meer referenties en hoe dichter de referentiewaarden bij elkaar liggen, des te fijner is de "resolutie". In het nu volgende toepassingsvoorbeeld worden drie operationele versterker-elementen van het viervoudige operationele versterker-element als comparatoren gebruikt. De referentiewaarden worden door een keten van weerstanden geleverd. Het doet een beetje denken aan de 555. De aangelegde analoge spanning wordt dus gedigitaliseerd. En dat betekent dat we hier te maken hebben met een *analoog/digitaal omzetter (A-D omzetter)*.

286 Met de schakeling zoals aangegeven in figuur 398 hebben we de beschikking over een gecombineerde analoge (instrument) en digitale (A-D omzetter met LED1 t/m LED3) indicatie van de uitsturing. De diverse elementen kunnen we nu zelf al verklaren. Daarom stellen we een zender in, draaien aan P1 en kunnen zien hoe tenslotte, afhankelijk van de mate waarin de geluidssterkte groter wordt, alle drie de licht-emitterende diodes aanspreken.

28. On chip: deel en tel op!

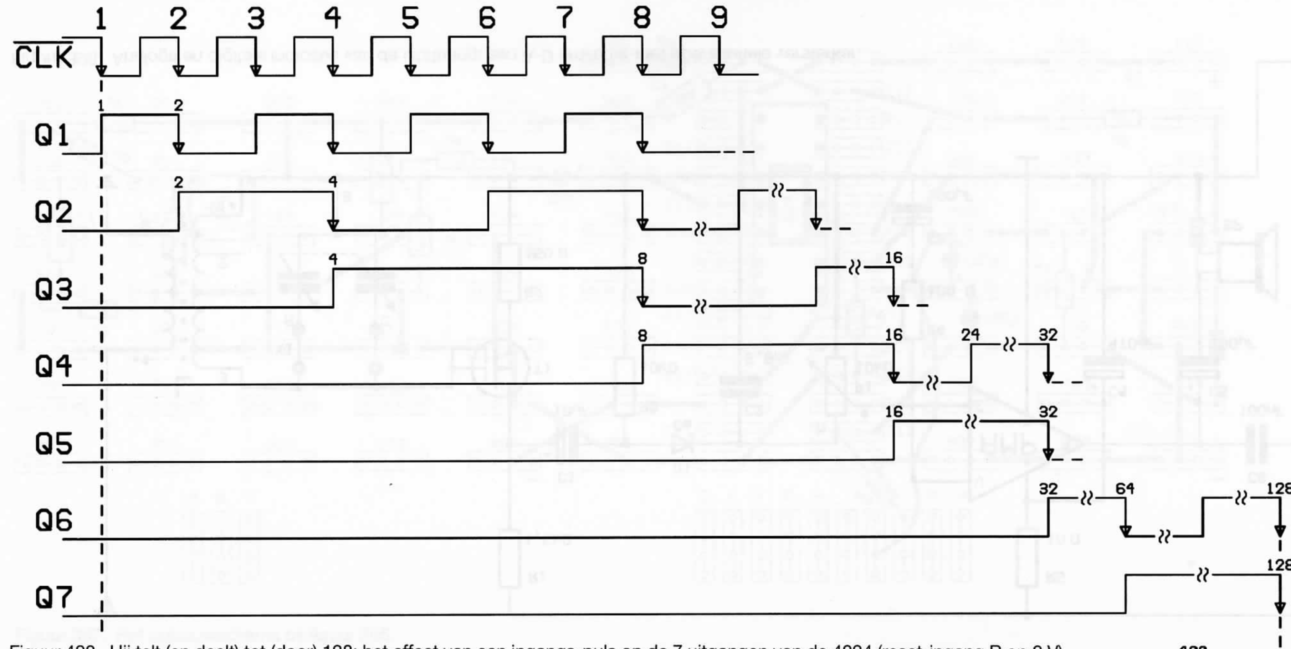
De dynamische transistor flip-flop kon nog niet eens tot drie tellen. Het aan elkaar schakelen ten behoeve van het verkrijgen van breder wordende telpulsen leverde vroeger behoorlijke problemen met de schakelingen op. Maar dat interesseert tegenwoordig niemand meer. Geïntegreerde schakelingen, zoals de 4024, voeren voor ons immers het optellen en delen uit.

Een paar persoonlijke gegevens

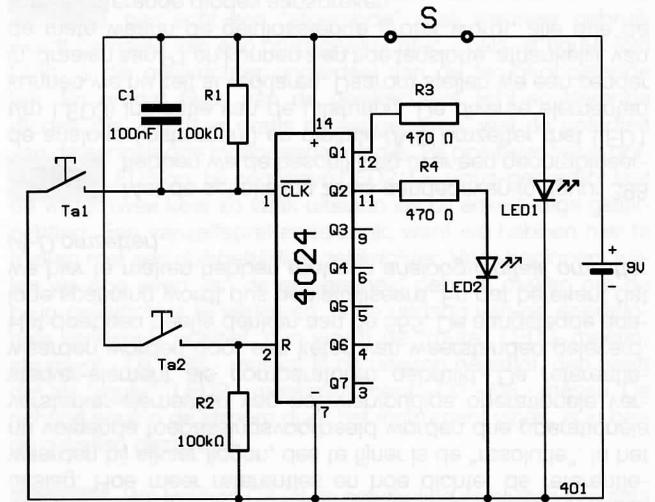
In een 14-polige behuizing zijn 7 flip-flop units op een chip geïntegreerd, waarvan telkens één uitgang via een buffertrap naar buiten wordt uitgevoerd. Hierop verschijnt de positieve spanning, indien die actief is. In rust zijn de uitgangen verbonden met de min-pool van de batterij. Intern zijn de elementen zó achter elkaar geschakeld dat elke tweede puls (aan ingang CLK) het volgende element doet kippen. Elke tweede puls van *dit* signaal doet dan weer het daarop volgende element kippen, etc. Op de uitgangen Q1 t/m Q7 is de volgorde waarin iets gebeurt dus 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128. De laatste uitgang Q7 wordt pas bij de 64e ingangs-puls hoog en bij de 128e weer laag. Dit gedrag wordt in figuur 400 schematisch weergegeven.

Met een positieve puls op ingang R kan alles worden gewist; alle uitgangen zijn dan op min aangesloten. Anders staat op R 0 V. Pulsingang CLK werkt inverterend. Deze ingang wordt dan ook op plus gehouden en de pulstrein schakelt hem telkens tijdelijk op min. Daar reageert de schakeling op. Bij het terugschakelen gebeurt er niets. De "telflank" is dus de overgang van "hoog" naar "laag", oftewel van H naar L (vanwege het Engels "high" en "low"), de gebruikelijke afkortingen in de digitale techniek. De 4024 is een CMOS-schakeling. Hij gedraagt zich ongeveer net zo als de MOSFET: geen ingangsstroom, maar wel gevoelig voor statische oplading. De ingangen moeten dus steeds, al naar gelang de toepassing, met plus of min worden verbonden en mogen nooit open blijven. Want wat er dan zou gebeuren zullen we dadelijk gaan zien.

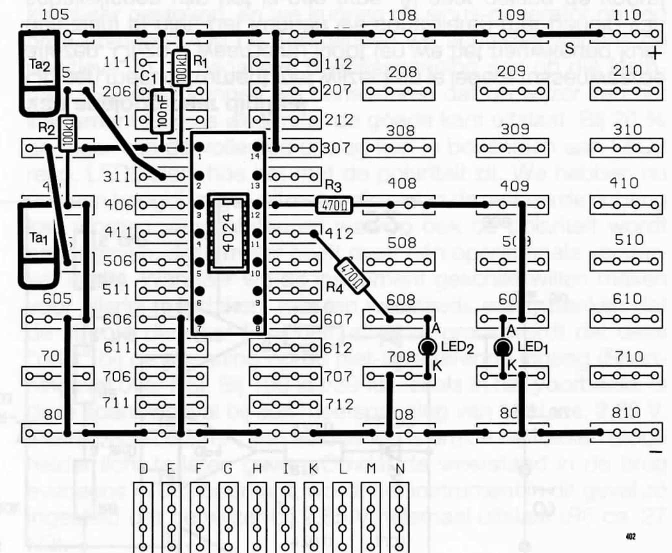
287 De 4024 wordt in plaats van de operationele versterker in de IC-voet gestoken, waarbij de inkeping in de voet weer op één lijn moet liggen met die in de behuizing. De aansluitingen zijn genummerd, te beginnen bij 1 links van de inkeping, en vervolgens tegen de wijzers van de klok in tot en met 14. In het experiment zoals aangegeven in figuur 401 laten we eerst ingang aansluiting 1 open, dus zonder *R*1 en *C*1, en sluiten de ons al bekende antenne uit het "spookexperiment", de lange draad dus, aan. LED2 wordt via *R*4 achtereenvolgens aangesloten op Q2, daarna op Q3 enz. We zien hoe de licht-emitterende diodes flikkeren. Vooral in de buurt van op het lichtnet aangesloten apparaten - of bij gebruik van de KOSMOS-nettransformator X. Zo kan netbromspanning bijvoorbeeld een op Q6 aangesloten LED met een ritme van iets meer dan 1 per seconde laten knipperen.



Figuur 400. Hij telt (en deelt) tot (door) 128: het effect van een ingangs-puls op de 7 uitgangen van de 4024 (reset-ingang R op 0 V).

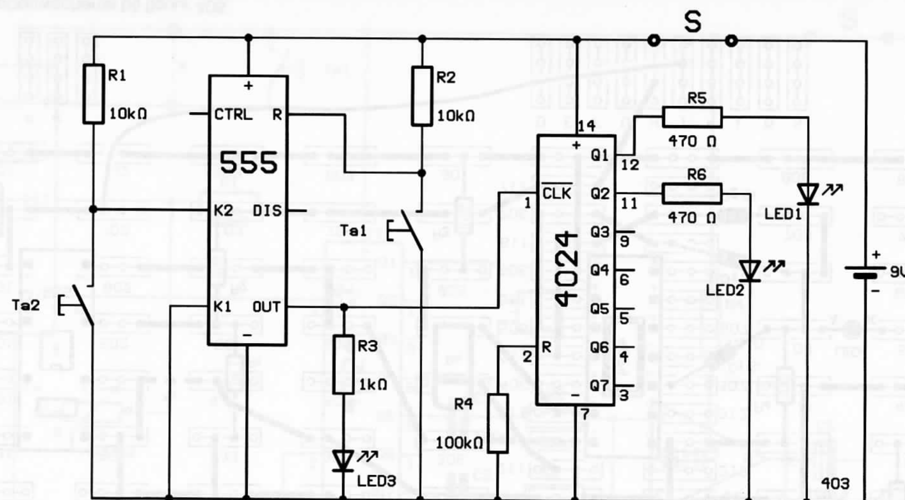


Figuur 401. De toegang tot de wereld van het tellen: merkwaardige resultaten.

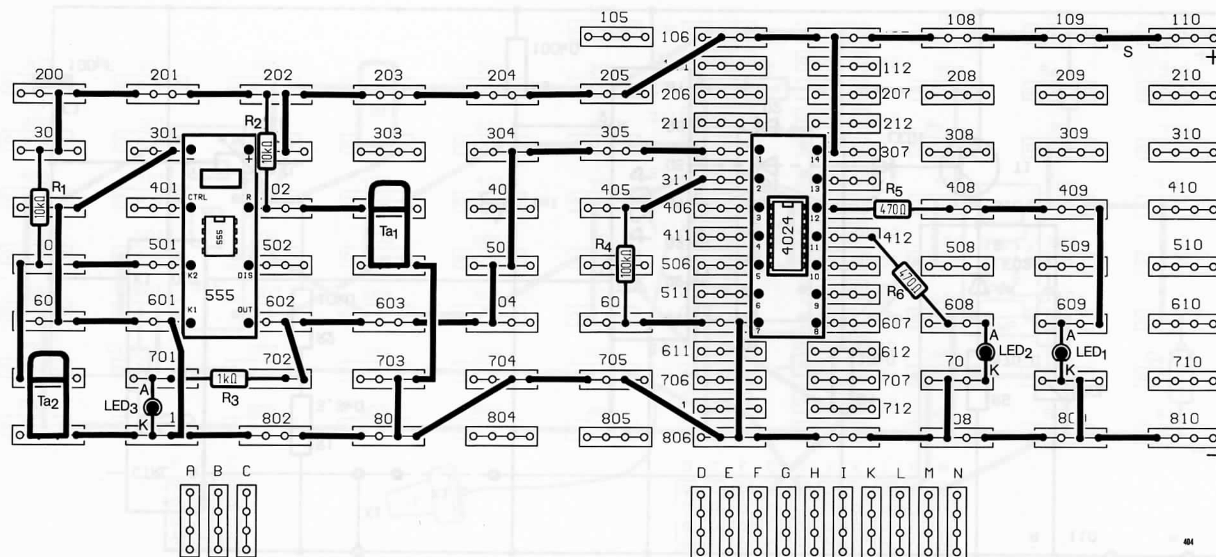


Figuur 402. Het opbouwschema bij figuur 401.

288 We verbinden 1 (CLK) nu met *R*1 en *C*1 en drukken op reset-druktoets Ta2. De licht-emitterende diodes gaan nu uit, en daarbij doet het er niet toe, op welke uitgang ze zijn aangesloten. Nu drukken we een paar keer op Ta1. Jammer genoeg zijn de reacties aan de uitgangen niet zo nauwkeurig als bij figuur 400. Dat komt door het contact dat de druktoets maakt en dat voor dit doel bijzonder slecht is,



Figuur 403. De 555: een toets die niet de neiging tot "dribbelen" heeft, zorgt voor geloofwaardige reacties. Net als in figuur 400.

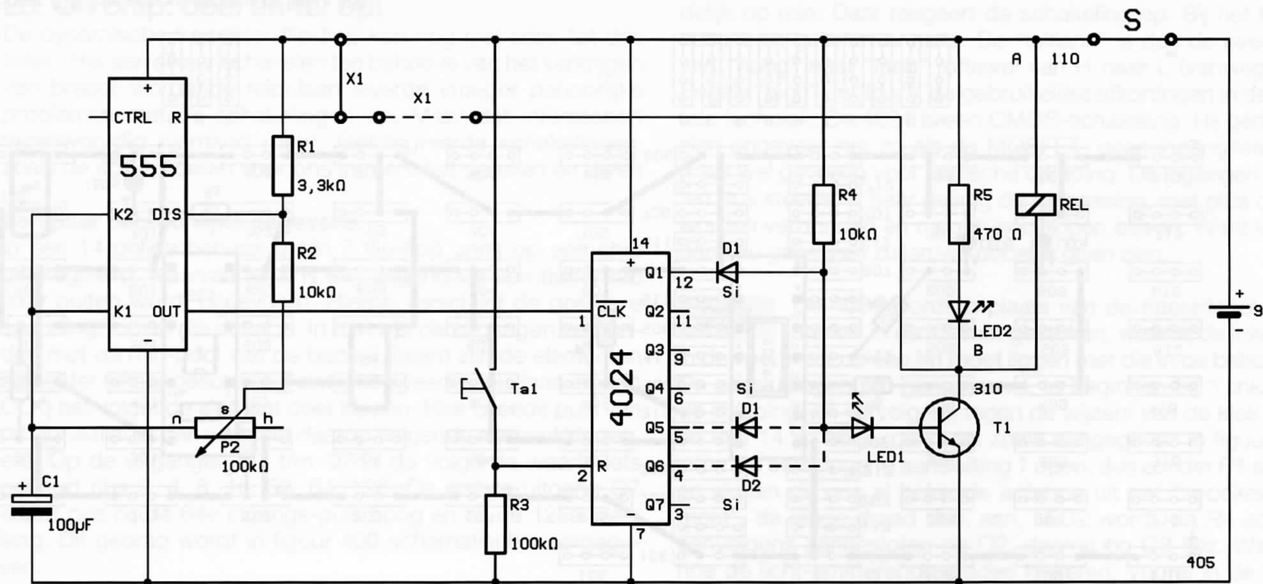


Figuur 404. Het opbouwschema bij figuur 403.

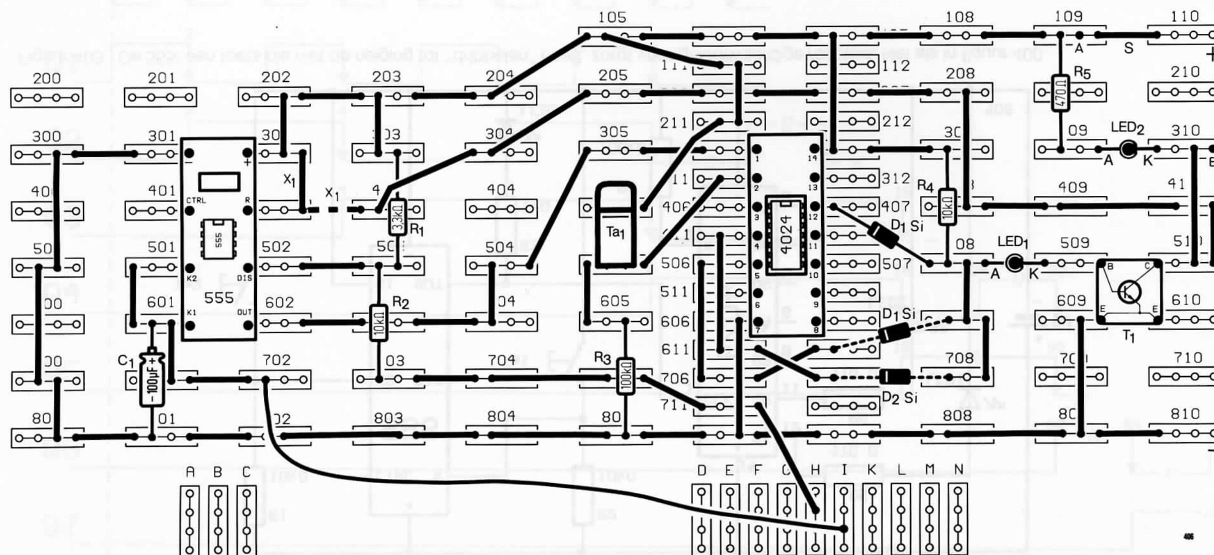
en door het feit dat de schakeling al bij een heel smalle puls schakelt. Mechanische contacten hebben, om het maar eens zo te zeggen, de neiging om te *"dribbelen"*, ze leveren meerdere pulsen, wanneer ze worden geactiveerd. En de condensator C1 kan dat niet helemaal voorkomen.

289 Zoals aangegeven in figuur 403 bouwen we met behulp van de 555 een *niet-"dribbelende" druktoets*. Gewoonlijk vormen de beide druktoetsen samen één omschakelaar. De losse druktoetsen zorgen ervoor dat de zaak overzichtelijk blijft. Eerst drukken we op Ta2, waardoor LED3 oplicht. Druk nu maar eens op Ta1, zo vaak als je maar wil. LED1 resp. LED2 zal alleen bij de eerste keer drukken reageren. Met Ta2 maken we de 555-uitgang vervolgens weer hoog. Wanneer LED3 bij OUT licht geeft, kan opnieuw met behulp van Ta1 worden geschakeld. Het tellen gaat nu precies zoals het moet!





Figuur 405. Een hele serie tijdrekkers: de brede puls van de 555, die 128 keer zo breed kan worden gemaakt. Maximaal tijdsbereik met 470 µF voor *C*1!



Figuur 406. Het opbouwschema bij figuur 405.

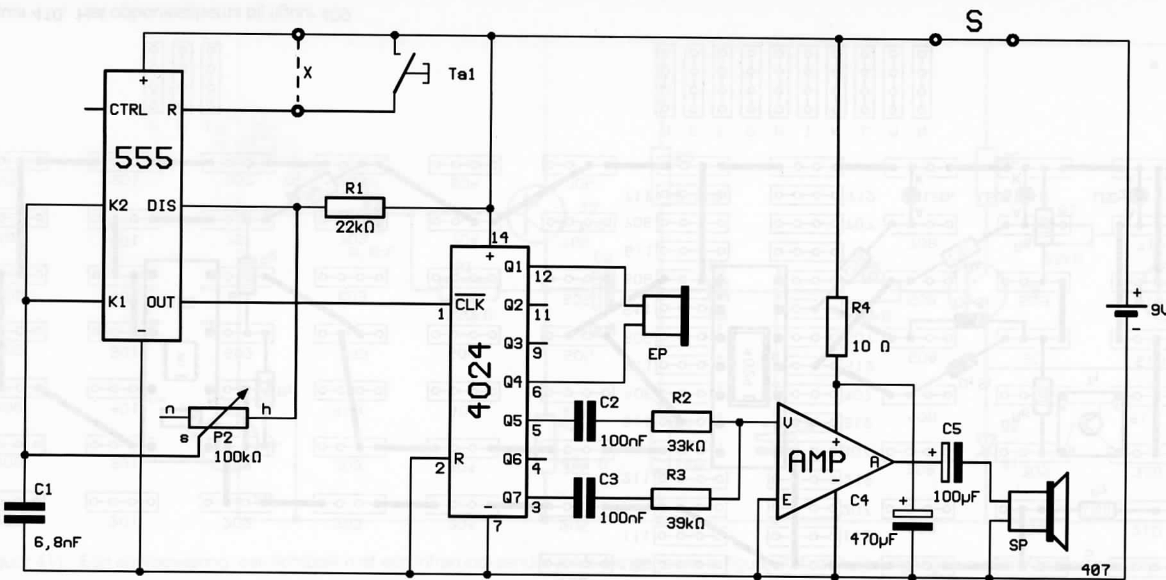
Een tijd-rekker

Met behulp van de 555 als monoflop is het heel goed mogelijk om 10 minuten te “beheren”. Als langzaam lopende multivibrator kan zijn periode tot 128 keer zo lang worden gemaakt.

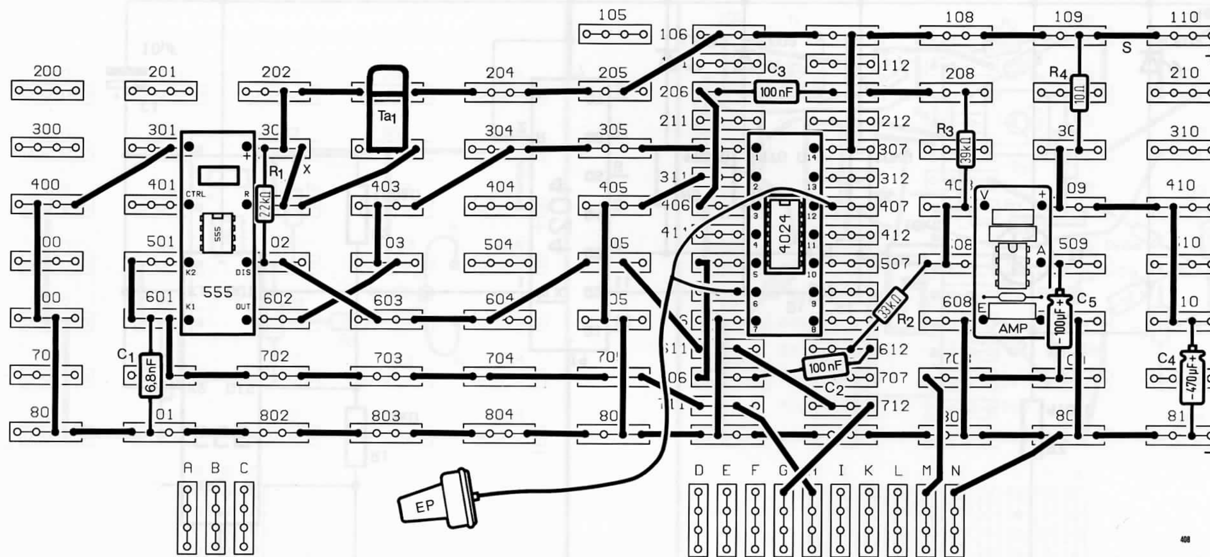
290 Eerst laten we in figuur 405 de verbinding R - T1 open en sluiten R aan op plus (brug X1 in de als doorlopende lijn getekende stand). Van de Si-diodes wordt voorlopig alleen D1 aangesloten, en wel op Q1. Het relais REL is op dit moment nog even niet nodig. Daarmee kunnen we later - met vertraging - van alles en nog wat gaan schakelen. Stel P2 in op de minimale waarde (n) en gebruik voor *C*1 eerst maar eens even 100 µF, zodat alles sneller kan gaan. Aan de uitgang van de 555 wordt elke 2,5 seconden een puls - en een neergaande flank! - gegenereerd, want *T* is immers 0,7·*C*1·(*R*1 + 2*R*2). Gedurende deze tijd zal LED2 periodiek oplichten en doven, want Q1 wordt hoog bij de eerste neergaande flank, laag bij de tweede enz. Indien Q laag is, is T1 gesperd, is Q hoog, dan geleidt T1.

291 In de schakeling zoals aangegeven in figuur 405 worden nu de door een stippellijn aangegeven elementen toegevoegd (X1 wordt in de met een stippellijn aangegeven positie aangebracht. D1 moet worden verplaatst en D2 is nieuw.) Wanneer je op Ta1 drukt, start het geheel. De 555 genereert nu een pulstrein. Zoals je in figuur 400 ziet, wordt Q5 bij de 16e puls hoog. Q6 volgt bij de 32e puls. Op dat moment is echter Q5 juist voor een periode van 16 pulsen laag geworden. Van de 48e tot de 64e puls zijn ze allebei hoog. Hierop heeft de NEN-schakeling van D1 en D2 met LED1 en T1 gewacht; T1 gaat in geleiding. Daardoor stopt de generator (omdat de reset-ingang laag wordt) en de huidige toestand blijft gehandhaafd. We hebben hier te maken met een *instelbare inschakelvertraging*.

292 We halen de terugkoppeling op R van de 555 weer weg en sluiten de reset-ingang van de 555 met brug X1 weer aan op plus. Na de start kijken we wat LED2 doet. Ze dooft heel even, maar licht periodiek weer op. En dat is logisch, want nu loopt de teller immers door. Aan de hand van figuur 400 kunnen een heleboel interessante schakelfuncties worden uitgevoerd. We hoeven alleen maar de juiste uitgangen aan te sluiten. En wanneer we de maximaal inzetbare weerstands- en condensatorwaarden op de 555 aansluiten, kunnen we al met uren gaan rekenen, in het uiterste geval zelfs met een hele dag.



Figuur 407. Verdelen en laten horen: zeven octaven geproduceerd door één chip - combineren mag!



Figuur 408. Het opbouwschema bij figuur 407.

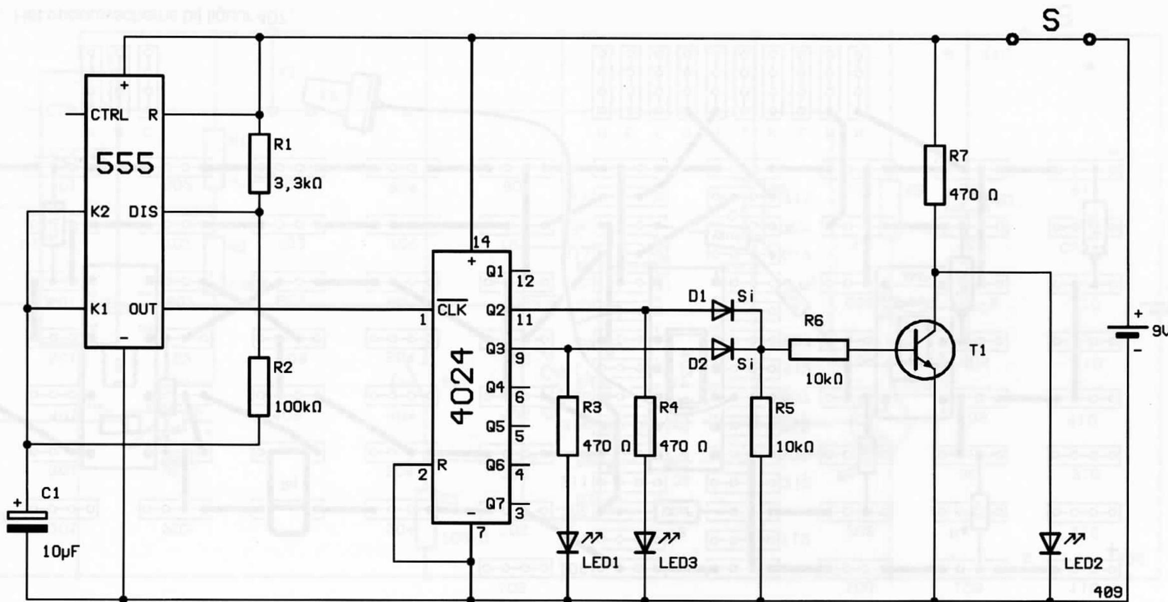
Digital sound

Met een paar kleine wijzigingen kunnen we de tijdschakelaar ook gebruiken als een mini-elektronenorgel.

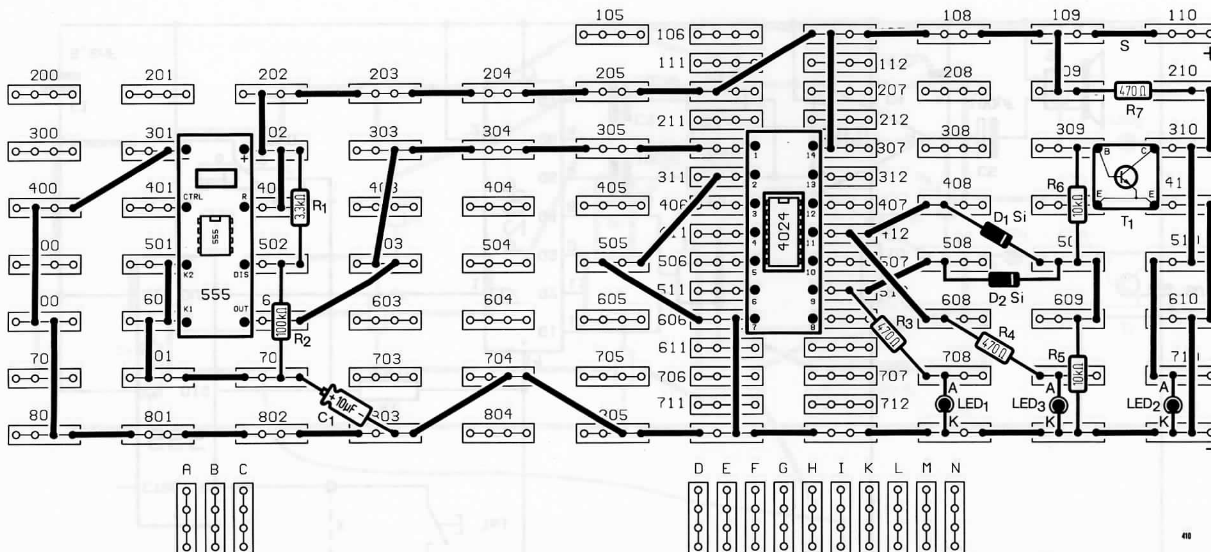
293 Al direct nadat je de schakeling zoals aangegeven in figuur 407 hebt opgebouwd, kun je muziek maken. Voor de "handbediening" is er knop P2. Draai en luister! Op iedere volgende uitgang verschijnt de helft van de frequentie van de vorige. De schakeling geeft dus 7 octaven. Anders aansluiten geeft interessante effecten. Verwissel maar eens willekeurig de verschillende aansluitingen op de uitgangen - ook de 555-uitgang hierin betrekken - en je zult de gekste geluiden uit SP te horen krijgen.

294 We verbreken de verbinding van R van de 555 met plus (brug X uit de schakeling trekken). Het orgel zal nu alleen spelen wanneer op de druktoets wordt gedrukt. Met P2 worden de tonen "vooraf gekozen". Een gunstige aansluitcombinatie is ook Q4, Q6. Bij deze combinatie worden de tonen hoger.

295 Steek oortelefoon EP met één kant in een op min aangesloten veer en met de andere kant in de uitgang van de 555. Stel nu met P2 een frequentie in die je nog goed kunt horen (P2-loper in de buurt van h). Tip nu met deze stekker achtereenvolgens Q1, Q2 etc. aan. Je krijgt dan alle octaven na elkaar te horen.



Figuur 409. Een verkeersregelaar voor je modelbouw-stad: een verkeerslicht met een rood/oranje-fase.

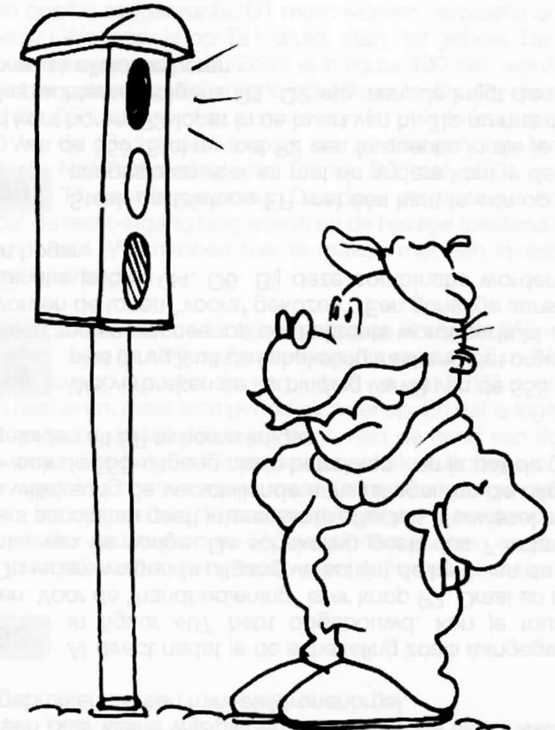


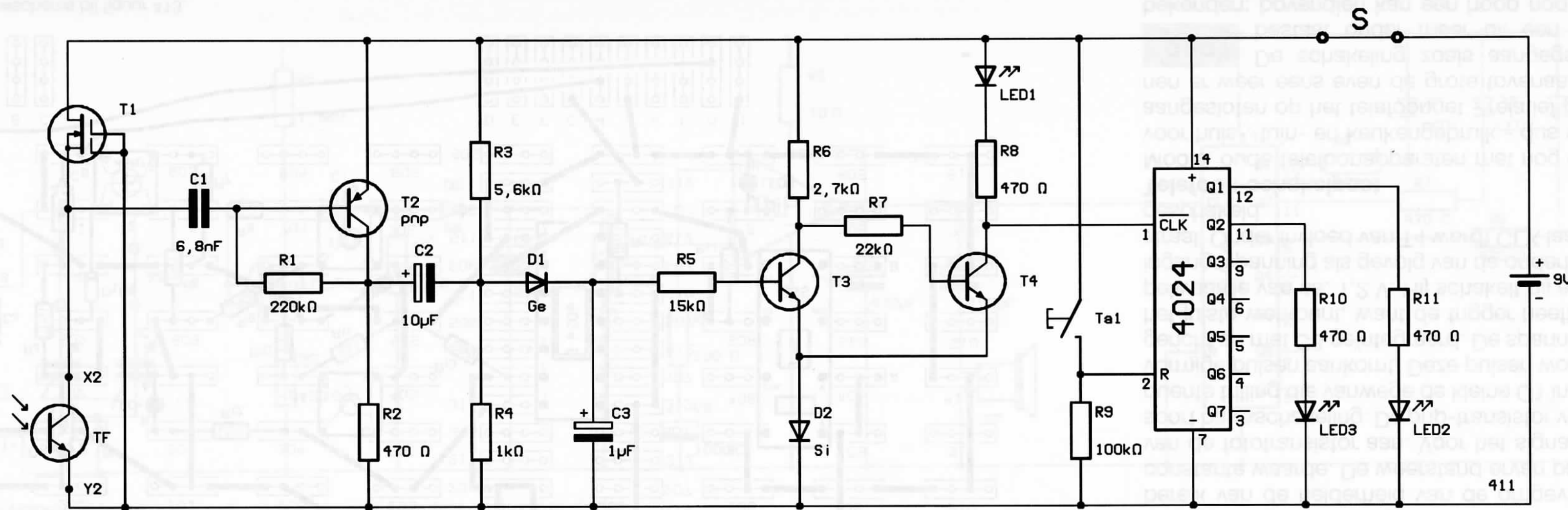
Figuur 410. Het opbouwschema bij figuur 409.

Een verkeersregelaar

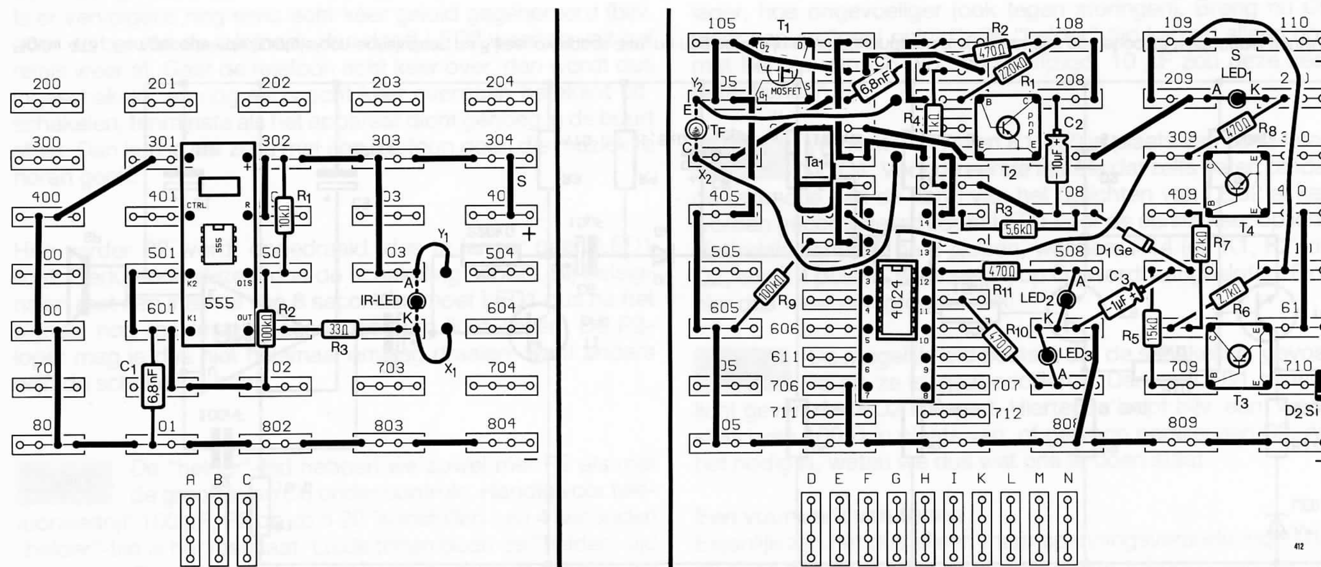
Een imitatie die voor speelgoed-auto's goed te gebruiken is.

296 De schakeling zoals aangegeven in figuur 409 levert, zoals je kunt zien, de fases groen, geel, rood, rood/geel, groen etc. op. De cyclus begint met het inschakelen (of na een reset-signaal, dat hier niet wordt besproken) met LED2 (groen). Wanneer alle uitgangen immers laag zijn, is T1 gesperd. Op de tweede neergaande flank wordt geel ingeschakeld (LED3). Want doordat Q2 hoog is, wordt T1 geleidend en onttrekt deze de stroom aan LED2. Bij elke tweede neergaande flank aan de ingang wisselt de fase. En aan de hand van figuur 400 kun je zelf afleiden hoe het dan verder gaat.





Figuur 411. Een aftelbewaking: een lichtbalk met een infrarood-zender zoals aangegeven in figuur 304; de telleruitgangen maken reacties mogelijk na een vooraf instelbaar aantal onderbrekingen.

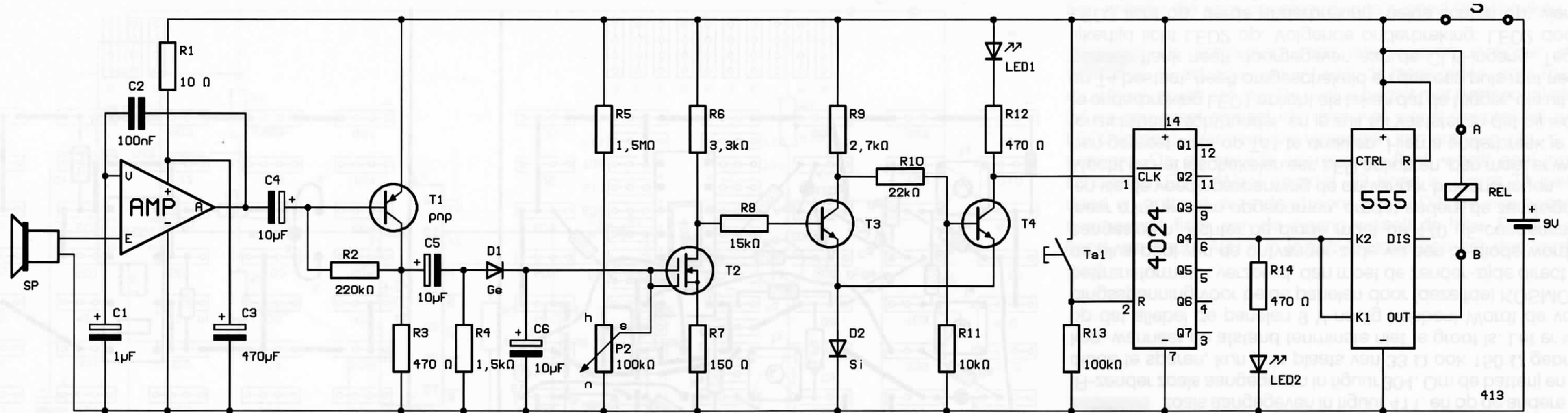


Figuur 412. Het opbouwschema bij figuur 411.

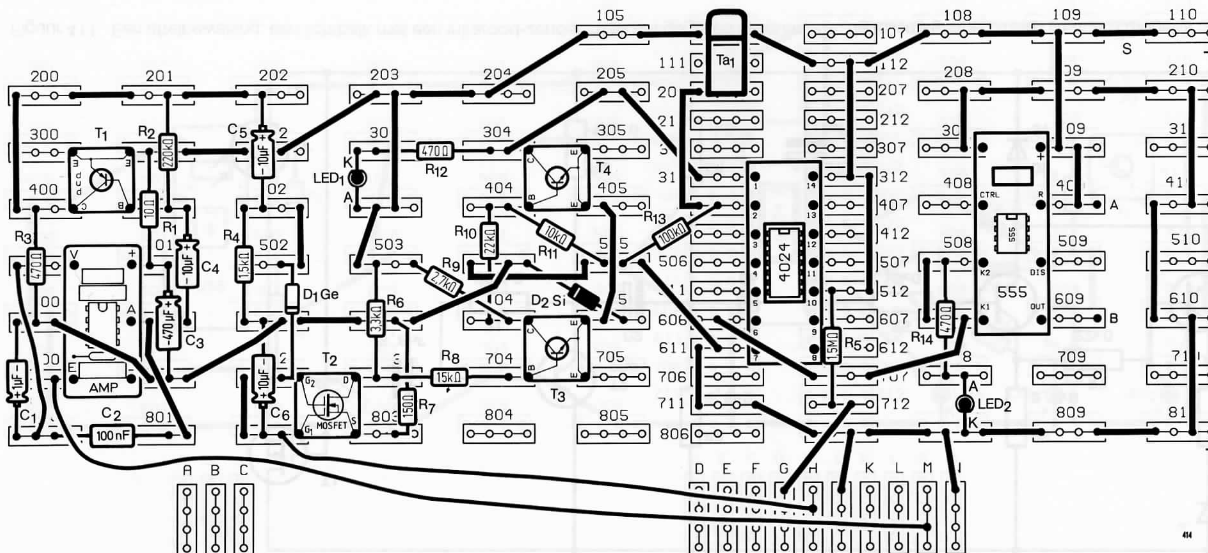
Bij de vierde heb je beet!

Een spelletje dat je elektronisch kunt nabootsen. In ons modelexperiment zetten we de twee panelen naast elkaar. In de ene bevindt zich de infrarood-zenddiode, in de andere de fototransistor. Tussen die twee in kun je speelgoedautootjes heen en weer laten rijden.

297 Op het ene paneel bouwen we de schakeling op zoals aangegeven in figuur 411, en op de andere de IR-zender zoals aangegeven in figuur 304. Om de batterij en de diode te sparen, kun je in plaats van 33 Ω ook 150 Ω gebruiken, wanneer de afstand tenminste niet te groot is. Let er wel op dat allebei de panelen 9 V nodig hebben! Wordt de voedingsspanning voor beide panelen door (dezelfde) KOSMOS-nettransformator verzorgd, dan moet de zender-zijde direct en de plus-pool van de ontvanger-zijde via een Si-diode worden aangesloten. Achter de diode moet de 470 µF-condensator (naar min) worden opgenomen, omdat anders de zendsignalen via de voedingsspanning de ontvanger binnendringen. Mocht na het inschakelen een LED oplichten, dan moet er worden gereset door op Ta1 te drukken. Hierna onderbreek je de (onzichtbare) lichtbundel, en je zult nu vaststellen dat bij iedere onderbreking LED1 oplicht als teken dat de trigger, die uit T3 en T4 bestaat, heeft omgeschakeld en dus een puls met neergaande flank heeft doorgegeven aan de CLK-ingang. Tegelijkertijd licht LED2 op. Volgende onderbreking: LED2 dooft, LED3 licht op; derde onderbreking: beide lichten op; vierde onderbreking: beide doven.



Figuur 413. Een gecodeerde huistelefoon-schakelaar: na 8 keer overgaan aan, na nog eens 8 keer uit. Veranderen mag, maar niet op het echte telefoonnet aansluiten! Zie de tekst voor variaties!



Figuur 414. Het opbouwschema bij figuur 413.

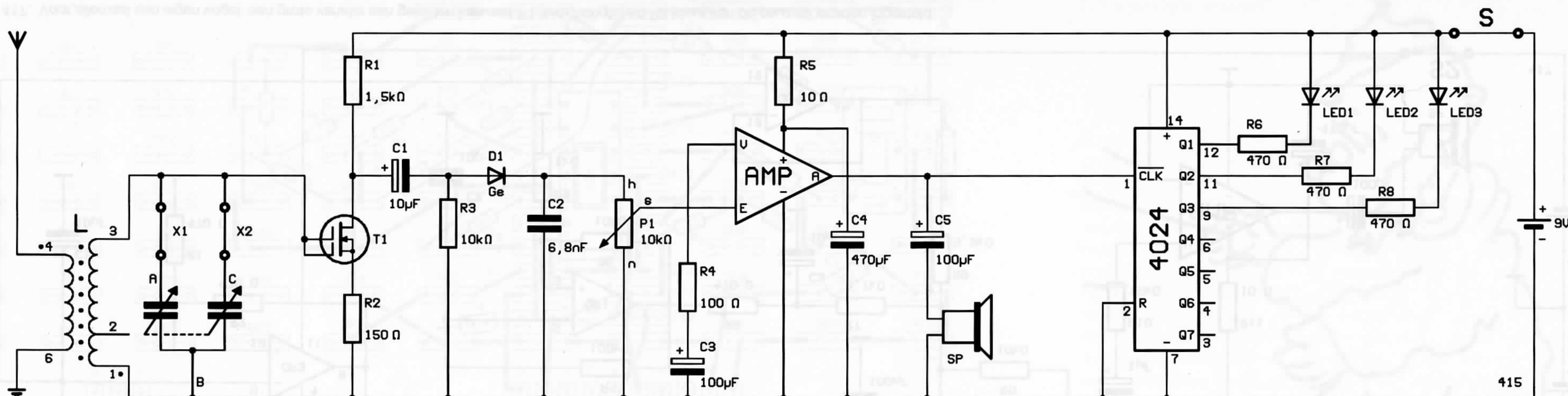
298 We sluiten LED2 nu in plaats van op Q1 aan op Q3 en onderbreken weer viermaal. Nu licht LED2 pas bij de vierde onderbreking op en dooft bij de achtste. Dit zou dan zo'n moment zijn waarop bijv. met behulp van de AMP als generator een akoestisch alarmsignaal zou kunnen worden opgewekt of waarop na vier pulsen een relais aanspreekt. En dan wordt de vierde gevangen!

De fototransistor (TF) werkt hier “samen” met een MOSFET. Deze MOSFET houdt de collector-emitterspanning van de fototransistor dankzij zijn karakteristieke lijn voor een groot bereik van de helderheid van de omgeving op een tamelijk constante waarde. De weerstand ervan past zich dus aan die van de fototransistor aan. Voor het signaal betekent het een soort basisschakeling. De pnp-transistor versterkt de toon-frequente trilling die vanwege de kleine C1 in de vorm van naaldvormige pulsen aankomt. Deze pulsen worden door D1 gelijkgericht en met C3 geïntegreerd. De spanningsdeler zorgt voor het juiste werkpunt, want de trigger heeft een ingangsdrempelwaarde van ca. 1,2 V. Hij schakelt bij een verlaging van de ingangsspanning als gevolg van de onderbreking van de lichtstraal. Onder invloed van T4 wordt CLK laag en wordt de teller geschakeld.

Telefoon-schakelpost

Mooie, oude telefoonapparaten met nog een echte “bel” zijn voor huis-, tuin- en keukengebruik - dus wanneer ze niet zijn aangesloten op het telefoonnet - relatief goedkoop. We kunnen er weer eens even de grote tovenaar mee gaan spelen.

299 De schakeling zoals aangegeven in figuur 413 bestaat onder meer uit een groot aantal oude bekenden; bovendien kan een hoop nog willekeurig worden



Figuur 415. Klank- en lichtspel met behulp van je radio. Amplitude-gestuurde licht-emitterende diodes.

veranderd. Een reeds vele malen beproefde variant is in de figuur afgebeeld. We houden *R*5 voorlopig nog even buiten de schakeling en stellen P2 in op ca. 30 %. Nadat we even op Ta1 hebben gedrukt, gebruiken we de luidspreker als microfoon. Even over de afdekking krabben moet voldoende zijn om LED1 ten minste een ogenblik lang licht te laten geven. Heb je dat acht keer gedaan, dan licht LED2 op en spreekt het relais aan. Is er vervolgens nog eens acht keer geluid gegenereerd (bijv. door de bel van de telefoon), dan dooft LED2 weer en valt het relais weer af. Gaat de telefoon acht keer over, dan wordt dus ingeschakeld, en nog eens acht keer overgaan betekent uitschakelen, tenminste als het apparaat dicht genoeg in de buurt staat. Dan kun je het zelfs met een telefoon doen die muziek te horen geeft!

Hoe verder P2 wordt opgedraaid, des te langer geeft LED1 licht. Gedurende deze tijd is de schakeling "doof". Bij belsignalen met een interval van 8 seconden moet LED1 dus na het signaal nog maximaal 4 seconden lang licht geven. De P2-loper mag je dus niet helemaal omlaag draaien, want anders blijft de schakeling doof!

300 De "helder"-tijd hebben we zowel met P2 als met de grootte van *C*6 onder controle. Handig voor telefoonbedrijf: 100 μF, P2 op zo'n 20 % instellen - en 4 seconden "helder"-tijd is het resultaat. Luide tonen doen de "helder"-tijd toenemen. En als er voortdurend leven is, gebeurt er helemaal niets meer.

301 We nemen nu *R*5 op en sluiten daarmee h van P2 via 1,5 MΩ aan op plus. Om een afstemming zonder vertraging te krijgen, moeten we *C*6 uit de schakeling trekken. P2 moeten we zó instellen dat LED1 nèt even licht geeft. En dan terugdraaien totdat de LED dooft. Zie je wel, daar is-ie dan, de hysteresis (die hier zo dringend nodig is)! De met P2 ingestelde waarde moet daar een beetje onder blijven. Hoe lager, hoe ongevoeliger (ook tegen storingen). Breng nu *C*6 weer aan en "geef geluid". De "helder"-tijd kan nu alleen nog met behulp van *C*6 worden gewijzigd. 10 μF zou deze keer beter kunnen zijn.

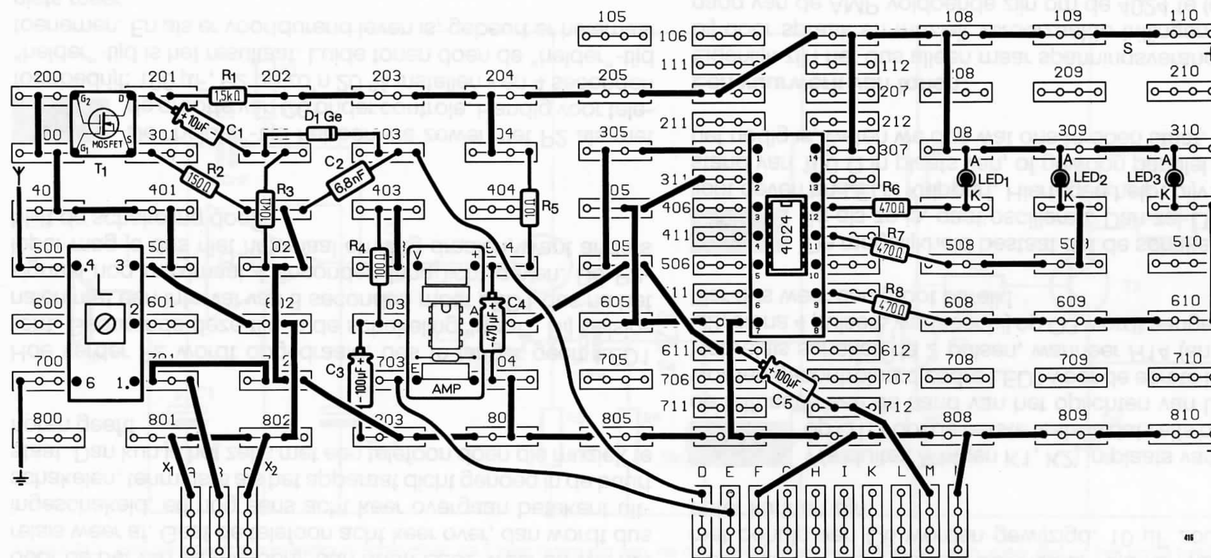
302 We sluiten *R*14 (en K1, K2) in plaats van op Q4 aan op Q1. Voor de eerste tests is dat zelfs beter, omdat de telfunctie aan de hand van het oplichten van LED2 al kan worden gecontroleerd zodra LED1 voor de eerste keer oplicht. Het relais schakelt na 2 pulsen, wanneer *R*14 (en K1, K2) op Q2, en na 4 pulsen, wanneer hij op Q3 wordt aangesloten. Ook hier dus weer een groot bereik!

303 De mogelijkheid bestaat dat de schakeling, gevoelig als ze is, gaat oscilleren. Dan zal LED1 continu licht geven en LED2 knippert. Hiertegen helpt bijv. een weerstand van 100 Ω in plaats van, of gewoon parallel aan D2. Als het nodig is, weten we dus wat ons te doen staat.

Een vuurwerk van tonen

Eigenlijk zijn het dus alleen maar spanningsveranderingen die bij door spraak en muziek veroorzaakte trillingen aan de uitgang van de AMP voldoende zijn om de 4024 te (doen) schakelen. Wat is er dan nog op tegen om een klein *lichtorgel* te bouwen, dat je met de AMP als uitgangstrap met voldoende hoge spanningspieken, op alle radio-schakelingen kunt aansluiten?

304 We bouwen de schakeling zoals aangegeven in figuur 415 op, of sluiten een andere geluidsbron met een voedingsspanning van 9 V aan op de ingang van de 4024. Vervolgens veranderen we de geluidssterkte en letten op wat de licht-emitterende diodes doen. Het is een duidelijke zaak: alleen wanneer de uitsturing groot genoeg is, zal CLK telkens voldoende ver naar min (laag) worden getrokken. Logisch, want alleen wanneer LED1 knippert kan (bij elke tweede neergaande flank) ook LED2 licht geven enzovoort.



Figuur 416. Het opbouwschema bij figuur 415.

29. De speeltuin (2)

Spelen is niet alleen maar lol maken. Spelen kan er ook toe bijdragen dat je leert te begrijpen.

Van Star Pieps tot Star Wars

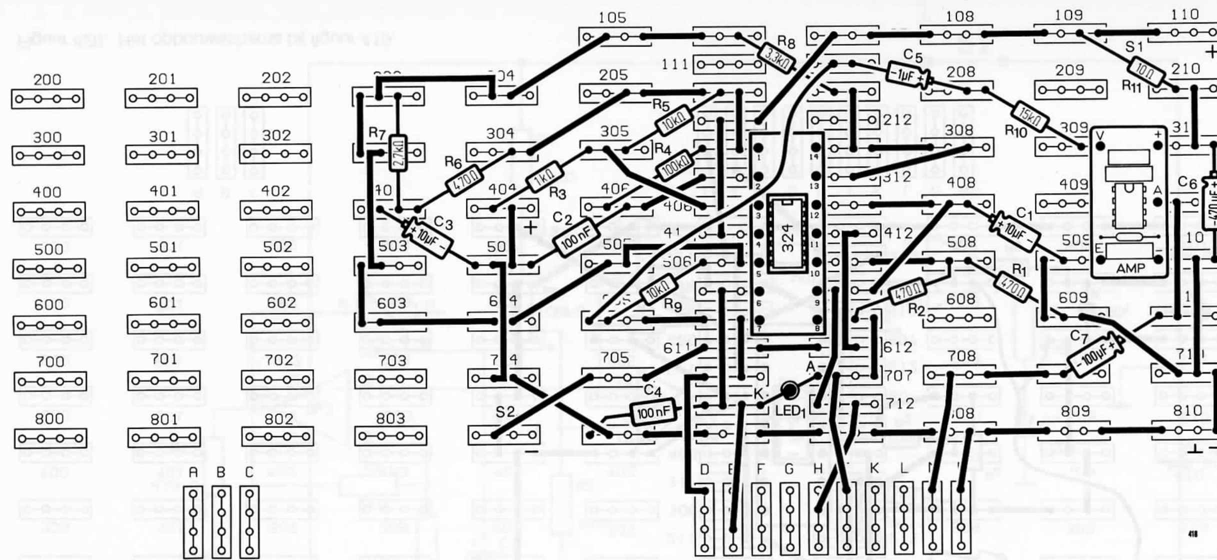
Drie blokgolfgeneratoren zijn voldoende om allerlei geluiden, van het piepen van een jong kuikentje en het krijsen van kraaien tot een huiveringwekkend geluid te kunnen krijgen dat uit de ruimte schijnt te komen. Denk eraan dat je dat na 10 uur 's avonds alleen mag doen met tenminste 100 Ω voor de luidspreker.

305 Bouw de schakeling op zoals aangegeven in figuur 417; je kunt het beste beginnen met *C*1 = 10 µF en met de potmeters in de middenpositie. Draai vervolgens aan P2 en let daarbij op het geluid en op de LED1. Je zult merken dat als LED1 licht geeft, het stil is. Hoe verder je s naar h toe draait, hoe langer de pauzes en de tijden dat er geluid is, duren. Bij P1 zitten de kuikentjes in de buurt van h, draai je naar n toe, dan komen de kraaien steeds dichterbij.

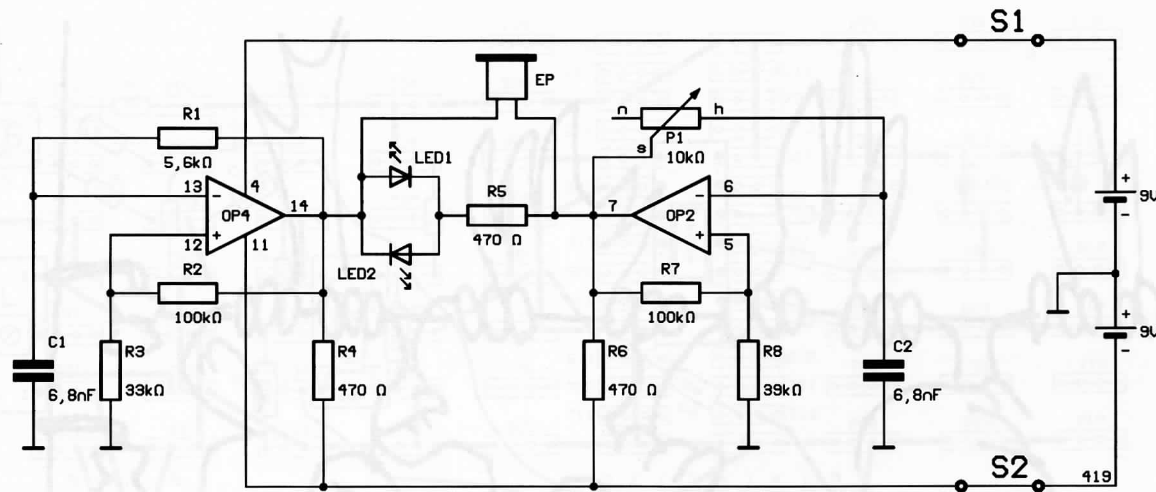
306 Gebruik nu voor *C*1 100 µF en verklein *R*6 tot 150 Ω. Een hoop gerammel van blik is het resultaat, en dat is lachen geblazen.

Omdat je nu alle basis-schakelingen inmiddels kent, kun je zelf de effecten verklaren!

Figuur 417. Voor allemaal een eigen vogel: een grote variatie aan geluiden kan met P1 (toonhoogte) en P2 (duur van de pauzes) worden ingesteld.



Figuur 418. Het opbouwschema bij figuur 417.

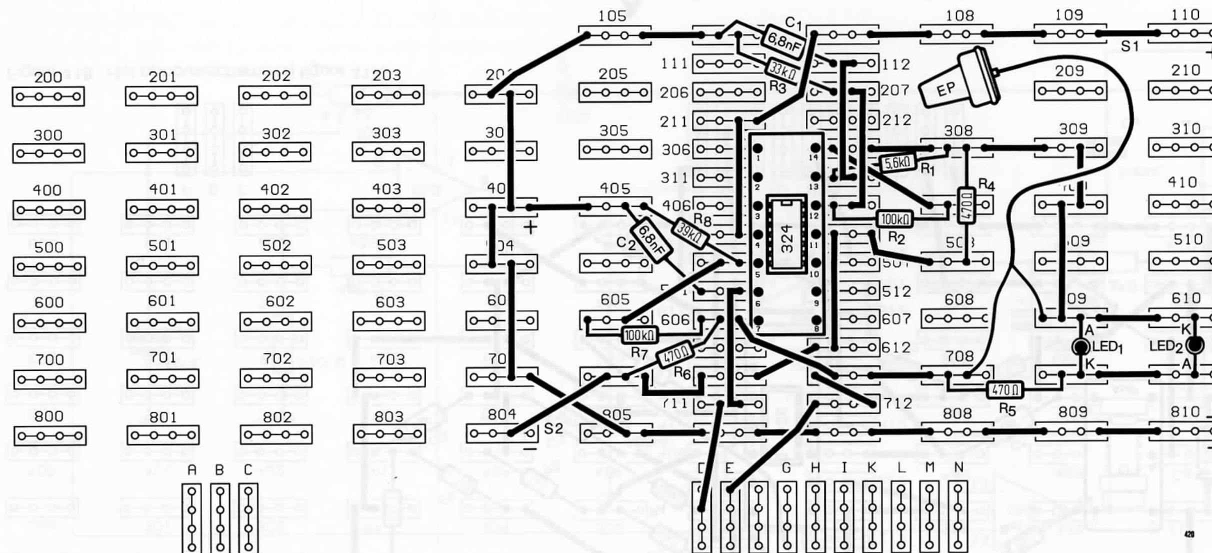


Figuur 419. Zwevingen, deze keer rechtstreeks in de oortelefoon: uit bij gelijk aanbod van links en rechts.

Geluid dat zweeft in de ruimte

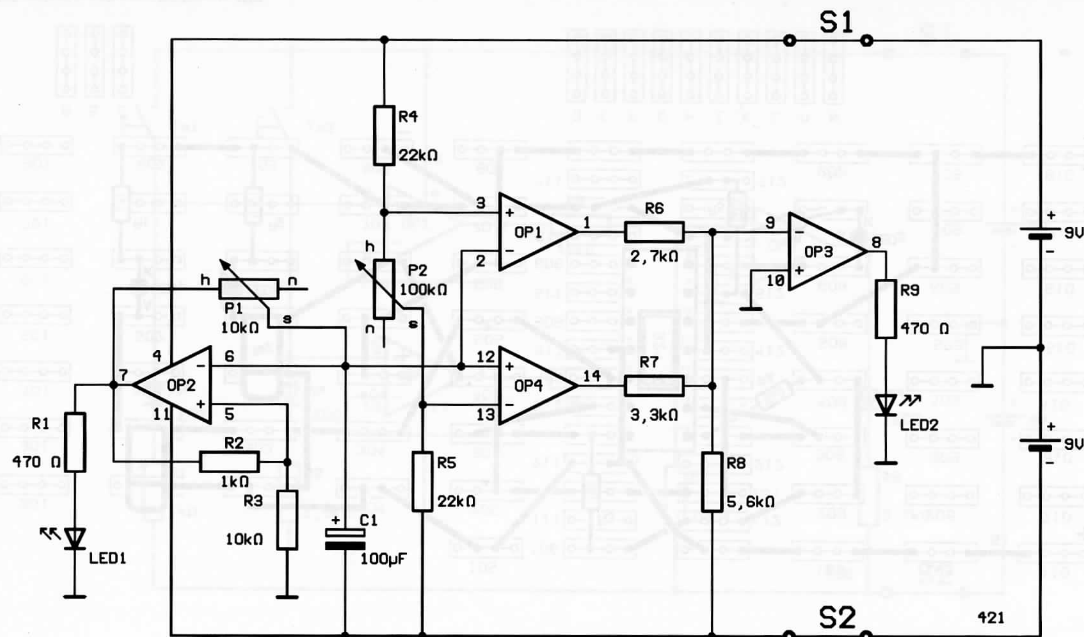
Zwevingen hebben we al gehad - in het oor. Deze keer koppelen we de generatoren zelf.

307 Wie de frequenties van de beide generatoren in figuur 419 te hoog vindt, kan voor *C1* en *C2* in plaats van 6,8 nF ook gelijk 100 nF kiezen. Draai daarna P1 maar eens langzaam heen en weer en kijk wat de licht-emitterende diodes en het geluid doen. Pas wanneer de diodes minder licht geven en het geluid zachter wordt, steek je de oortelefoon in je oor. Dat is het geval wanneer P1 ongeveer in het midden van het instelbereik staat. Bij een bepaalde stand van de potmeter hoor je helemaal niets meer. Alleen door de oortelefoon afwisselend aan te sluiten op elke uitgang en min blijkt dat beide generatoren nog steeds flink trillen. Alleen is nu het verschil binnen een smal instelbereik gelijk aan nul. Beide uitgangen hebben daarbij dus tegelijkertijd dezelfde amplitude en fase en natuurlijk dezelfde frequentie.

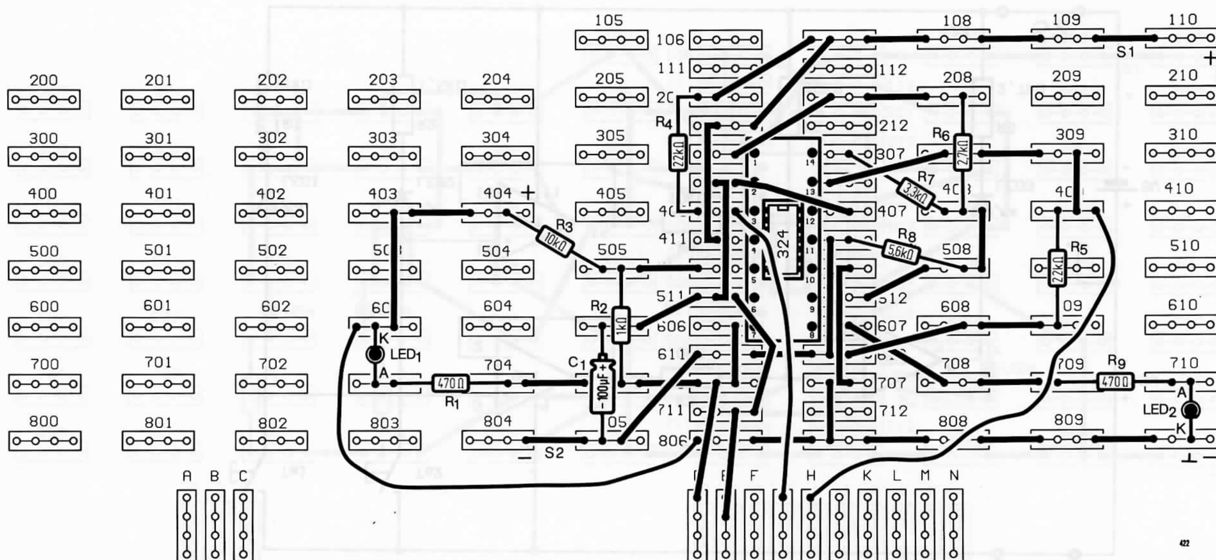


Figuur 420. Het opbouwschema bij figuur 419.





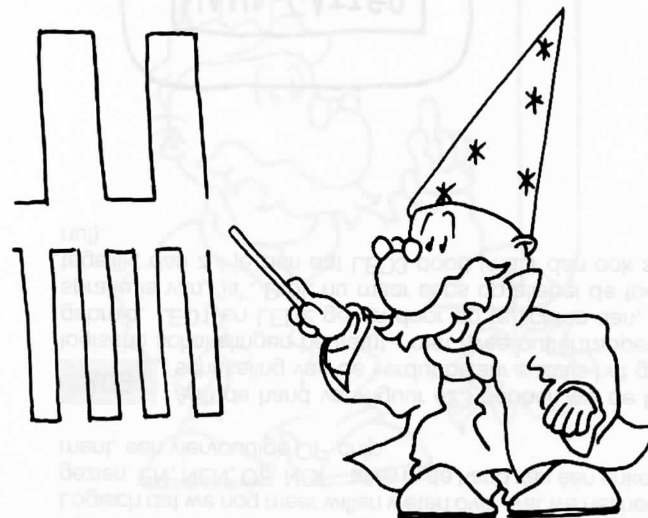
Figuur 421. Een dubbel venster: venstercomparator met instelbare opening (P2) verdubbelt de ingangsfrequentie (instelbaar met P1).

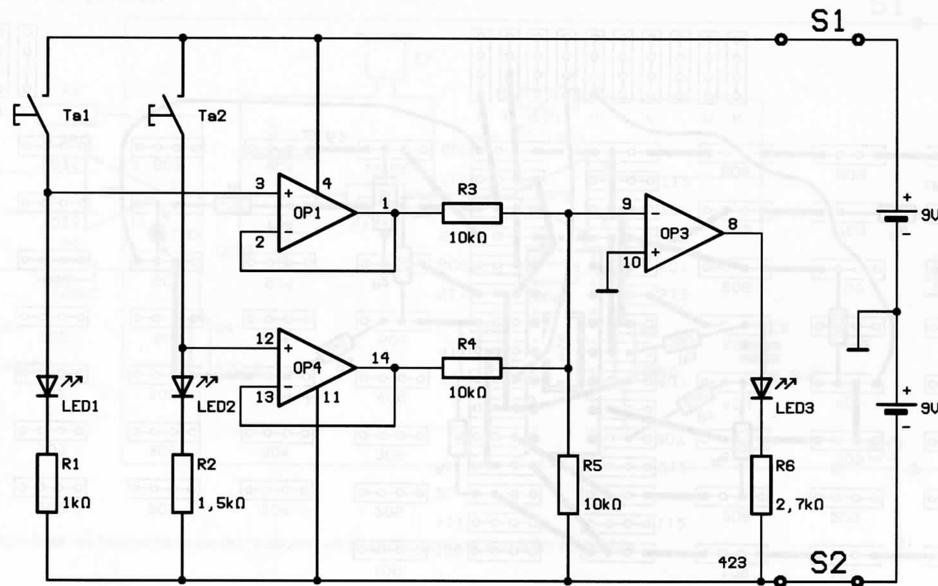


Figuur 422. Het opbouwschema bij figuur 421.

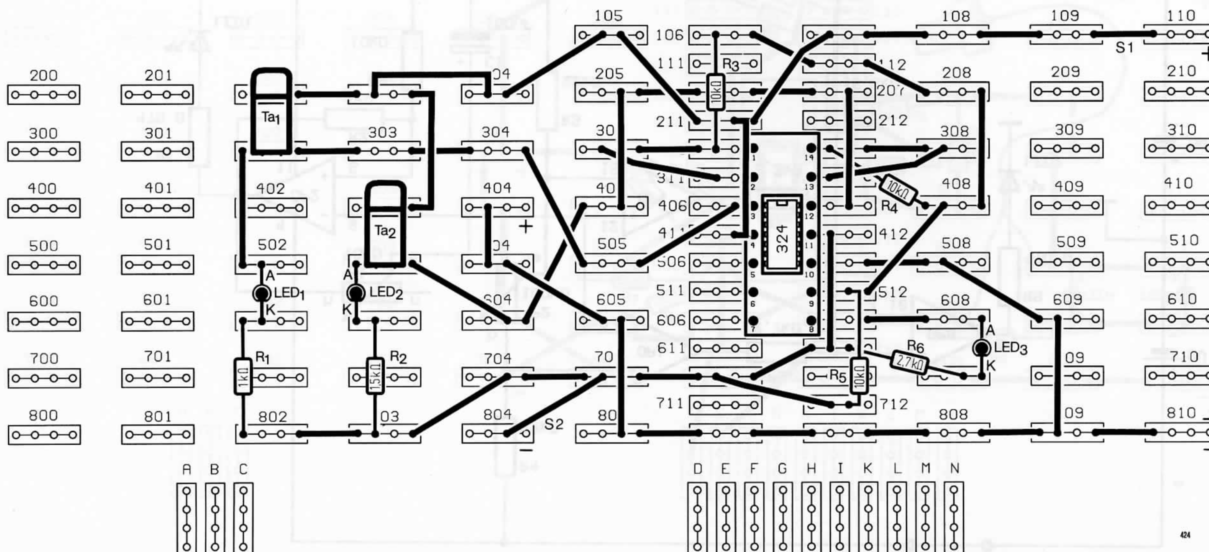
Uit één twee maken
Door generatoren en comparatoren op een handige manier met elkaar te combineren.

308 We bouwen om te beginnen alleen het linker deel van figuur 421 op en nemen voor *C*1 100 µF (resp. twee anti-serieel geschakelde elco's, zoals we al hebben uitgelegd). LED1 dient alleen als functie-indicator; deze LED knippert met frequentie *f1*. Laten we eens naar de rest van de schakeling kijken. Deze wordt gevoed met de zaagtand op *C*1, die bijna tussen de positieve en de negatieve verzadigingsspanning heen- en weer "wandelt". Met P1 ongeveer in het midden wordt de afstand tussen de schakeldrempels van de beide comparatoren bepaald. Wat zien we nu? LED2 knippert tweemaal zo snel als LED1. We hebben dus een *frequentie-verdubbelaar* gekregen. Deze werkt op basis van de verschillende stromen die naar het knooppunt van de laatste operationele versterker stromen, en wel al naar gelang het niveau van de comparatoruitgangen. Maar laten we daar niet teveel woorden aan vuil maken. Kijk er maar eens naar, je kunt er de kennis die je met je experimenteerdoos hebt opgedaan, goed mee testen! Het hart van deze schakeling noemen we trouwens een *venstercomparator*. Het "venster" wordt met behulp van P2 ingesteld.
De laatste operationele versterker functioneert in combinatie met de weerstanden als logische schakeling - bij "positieve logica" als NEN-schakeling. Immers: *R*6 *en R*7 moeten een positieve spanning voeren om te bereiken dat de uitgang omschakelt naar geïnverteerd plus (dus naar min).





Figuur 423. NEN-bewerking met een operationele versterker: gebufferde ingangen ontlasten de signaalbronnen.

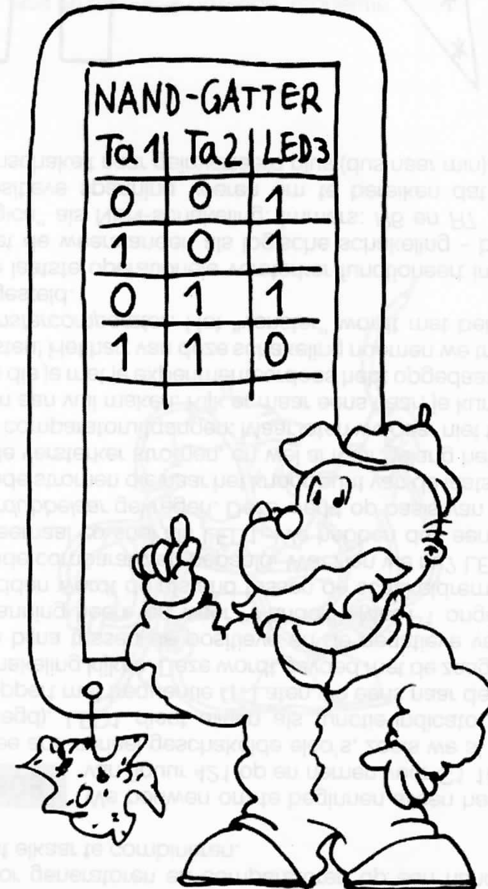


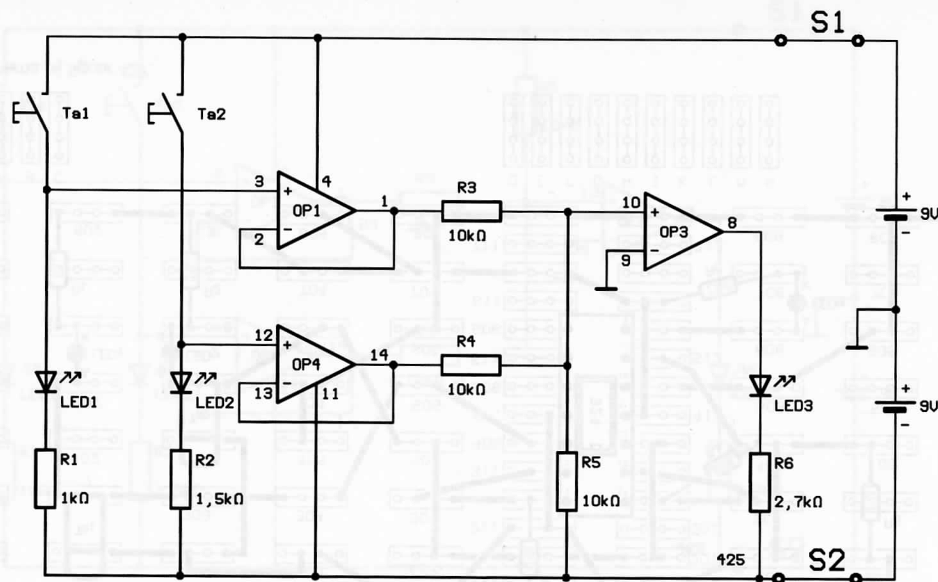
Figuur 424: Het opbouwschema bij figuur 423.

Operationele versterker-logica

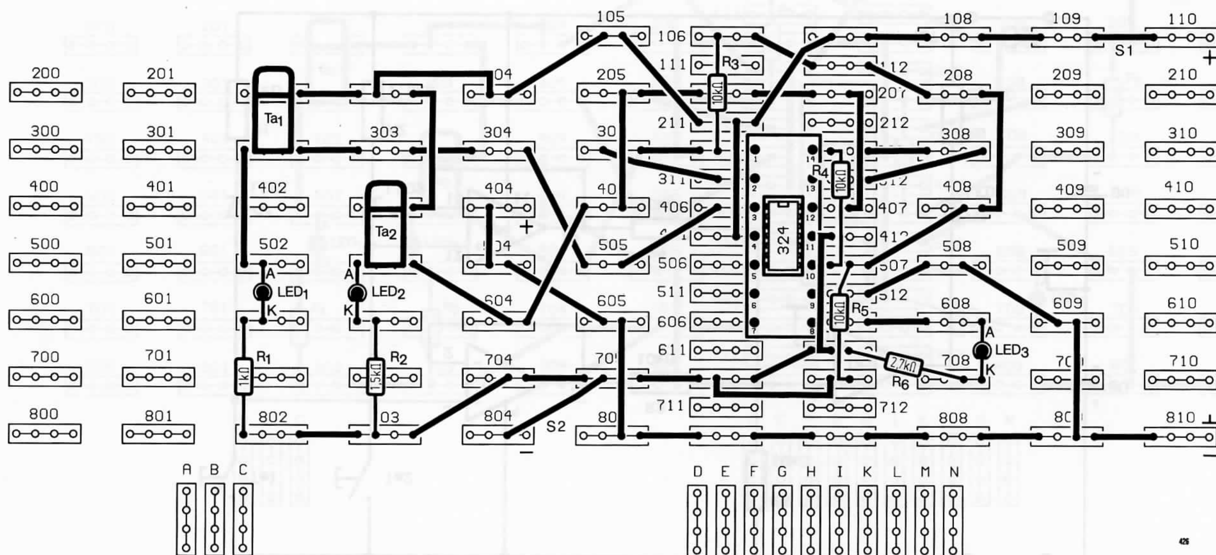
Logisch dat we nog meer willen weten over wat we net hebben gezien. EN, NEN, OF, NOF - alles in de hand van één enkel element, een viervoudige OP-chip.

309 Aan de hand van figuur 423 hebben we de NEN-schakeling van de verdubbelaar - zoals het goede logische schakelingen betaamt - met twee buffertrappen uitgebreid. LED1 en LED2 geven door op te lichten aan, waar sprake is van "ja". Druk nu maar eens op allebei de toetsen tegelijk, dan zul je zien dat LED3 dooft (maar dan ook alléén nu!).



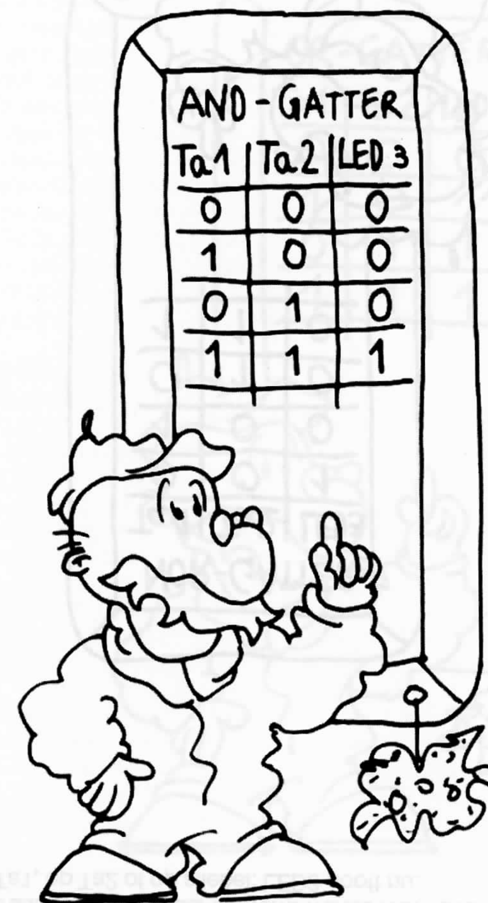


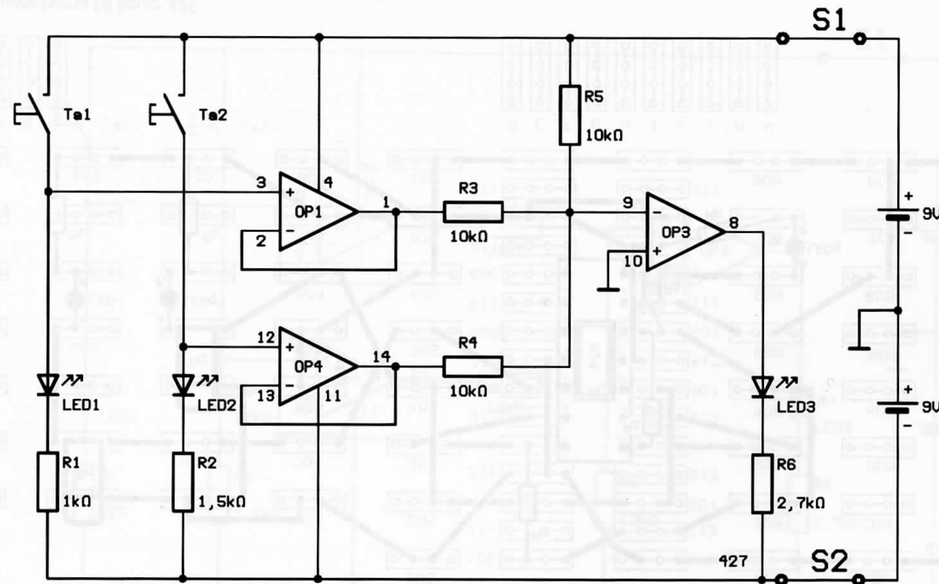
Figuur 425. EN-bewerking, van NEN afgeleid: de ingangen omwisselen is al voldoende.



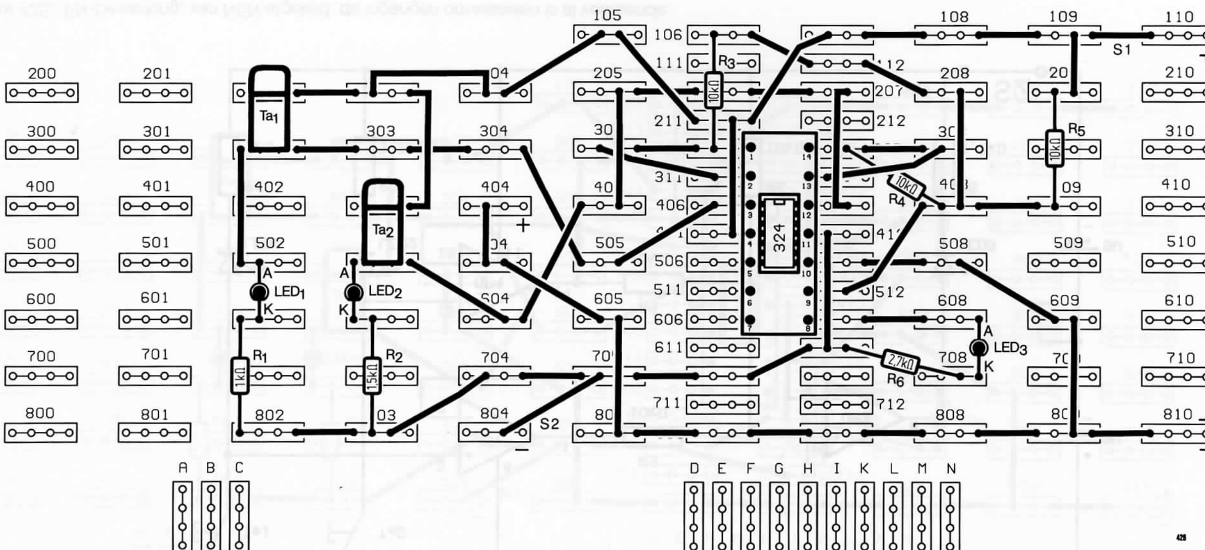
Figuur 426. Het opbouwschema bij figuur 425.

310 Van NEN naar EN. Op een heel eenvoudige manier: je hoeft op de derde operationele versterker alleen maar ingangen andersom aan te sluiten (zie figuur 425). Dan druk je op beide toetsen en LED3 geeft licht (maar dan ook alléén nu!).



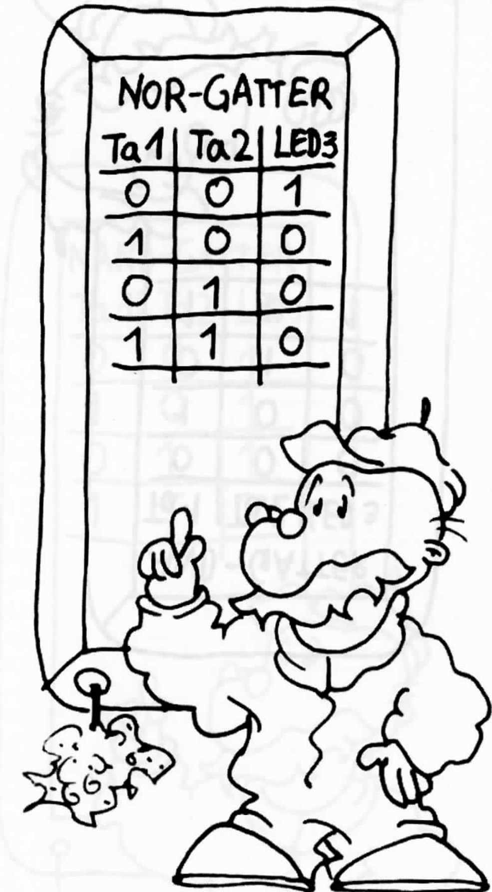


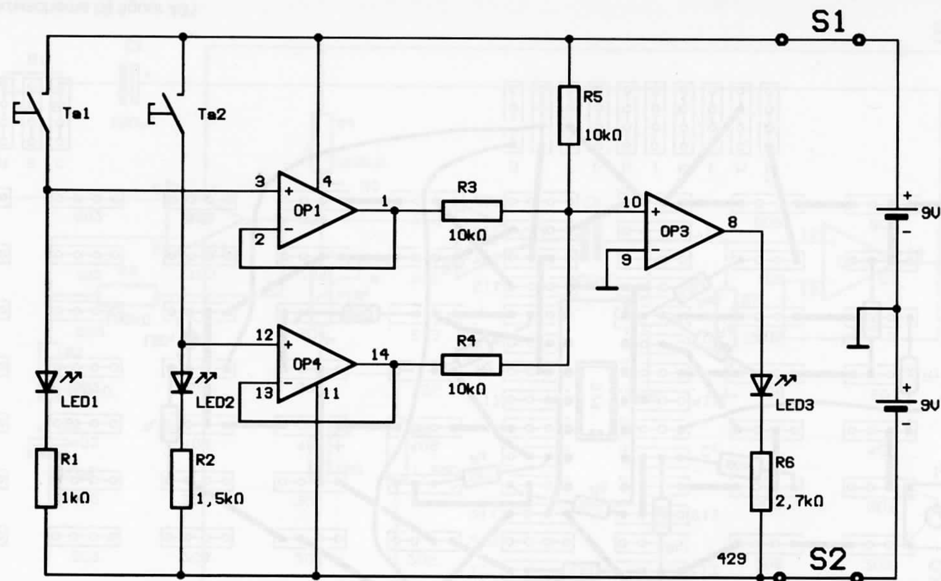
Figuur 427. NEN door te verwisselen: *R5* op plus aansluiten (bij NEN op min).



Figuur 428. Het opbouwschema bij figuur 427.

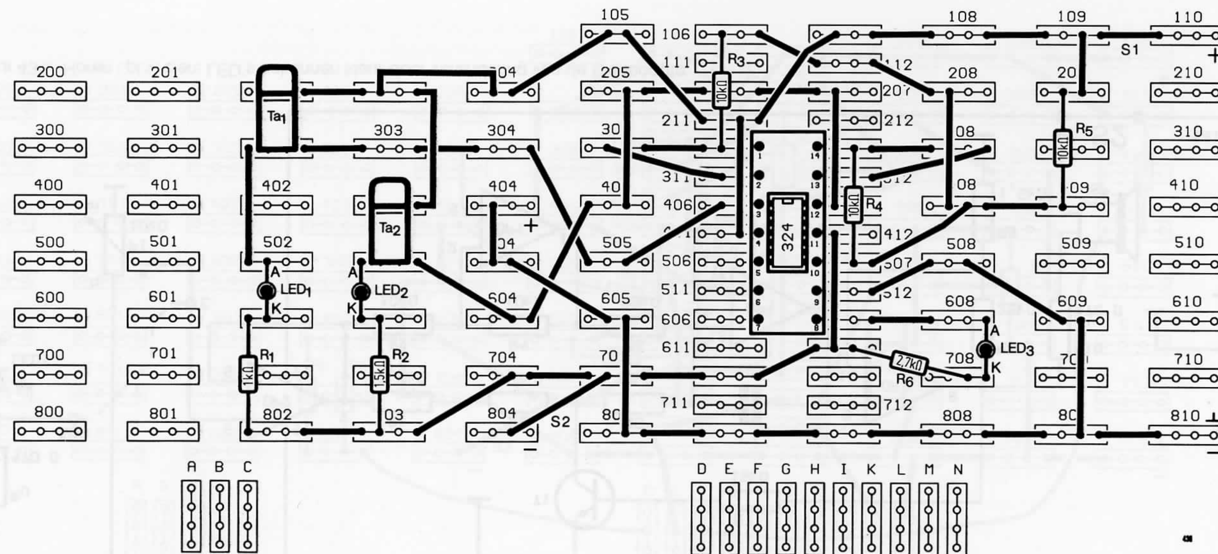
311 De schakeling zoals aangegeven in figuur 427 wijkt maar weinig af van haar voorgangsters (*R5* is nu op plus aangesloten). Maar ze werkt wel als NOF. Druk maar eens op Ta1, op Ta2 of op allebei: LED3 dooft nu.



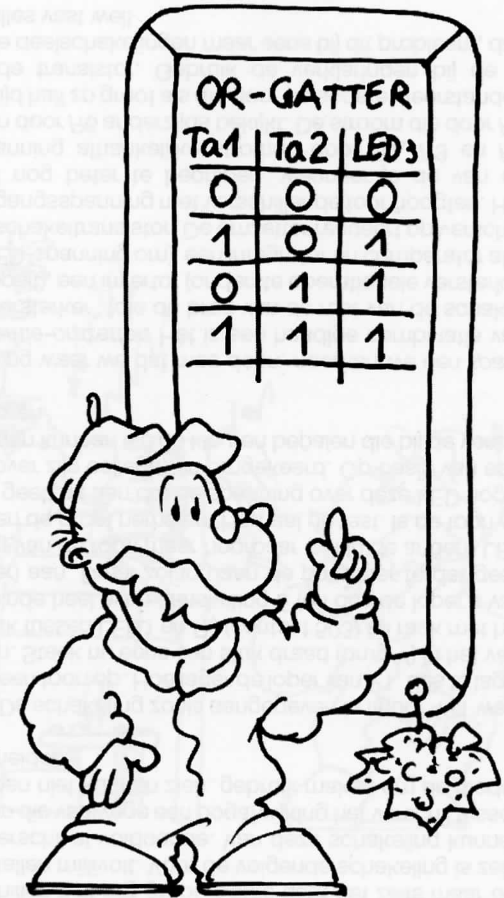


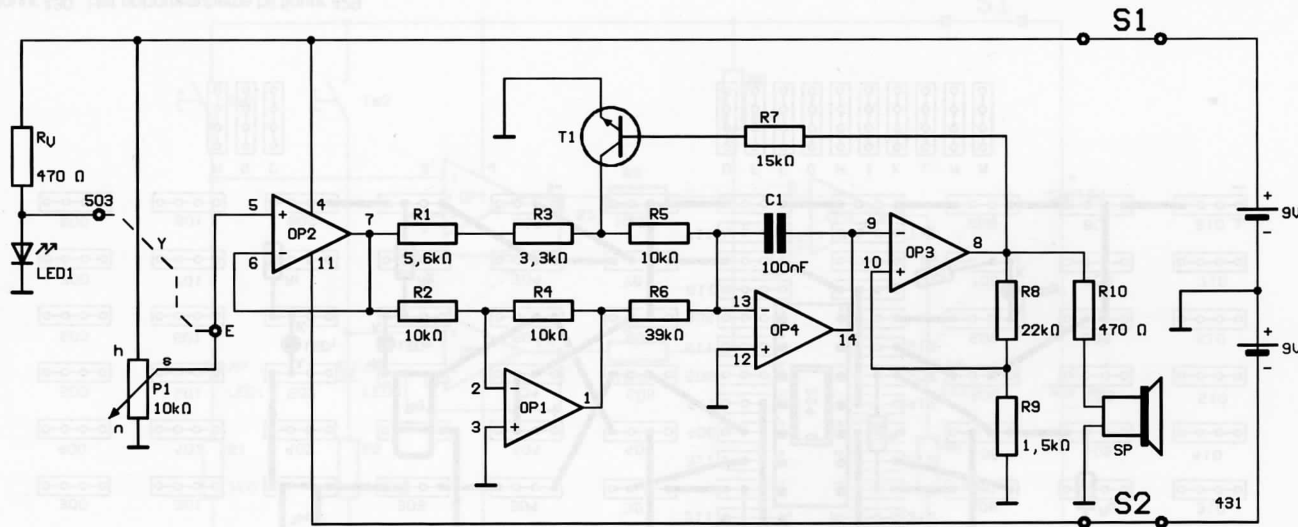
Figuur 429. OF uit NOF: de ingangen verwisselen. Net als bij EN dus.

312 Deze serie proeven sluiten we af met OF zoals aangegeven in figuur 429. Commentaar overbodig, nietwaar?

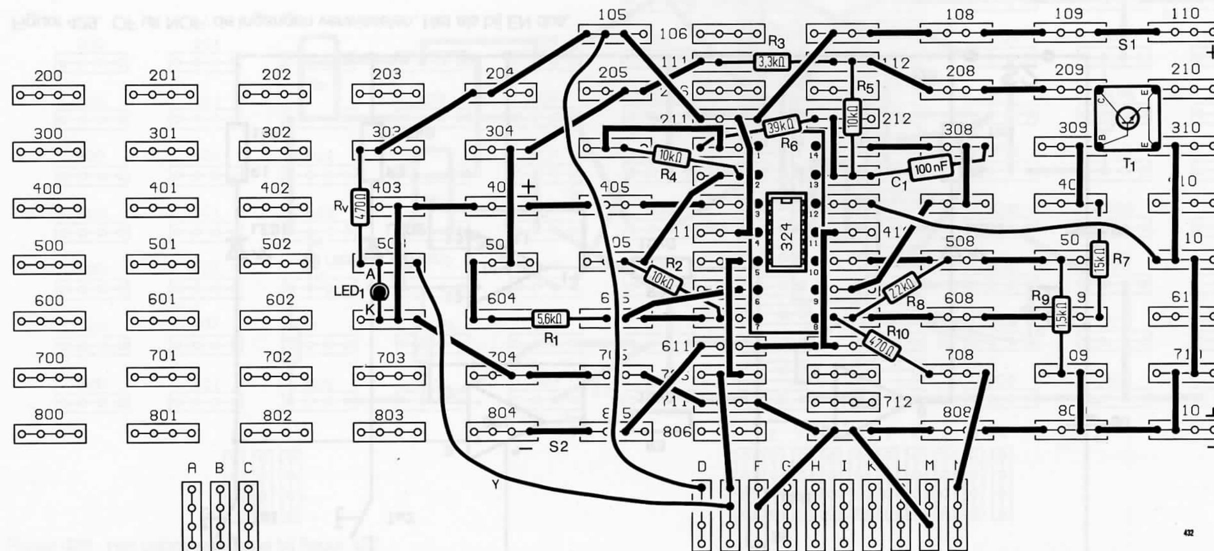


Figuur 430. Het opbouwschema bij figuur 429.





Figuur 431. Horen i.pl.v. zien: LED's bekennen kleur door verandering van de toonhoogte.



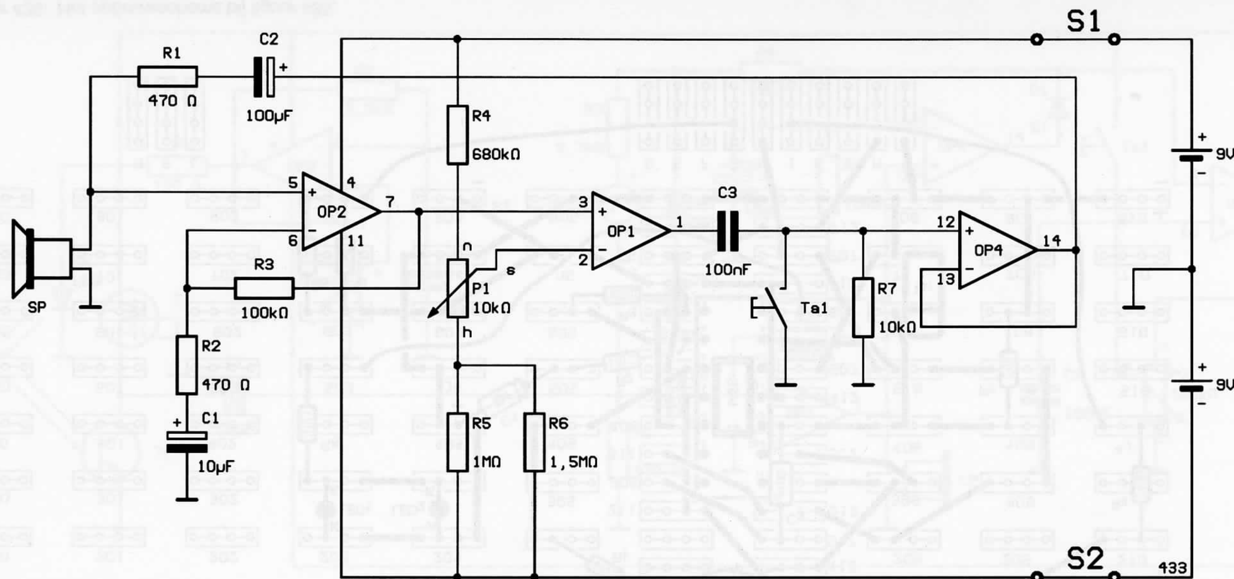
Figuur 432. Het opbouwschema bij figuur 431.

Geluid in kleur

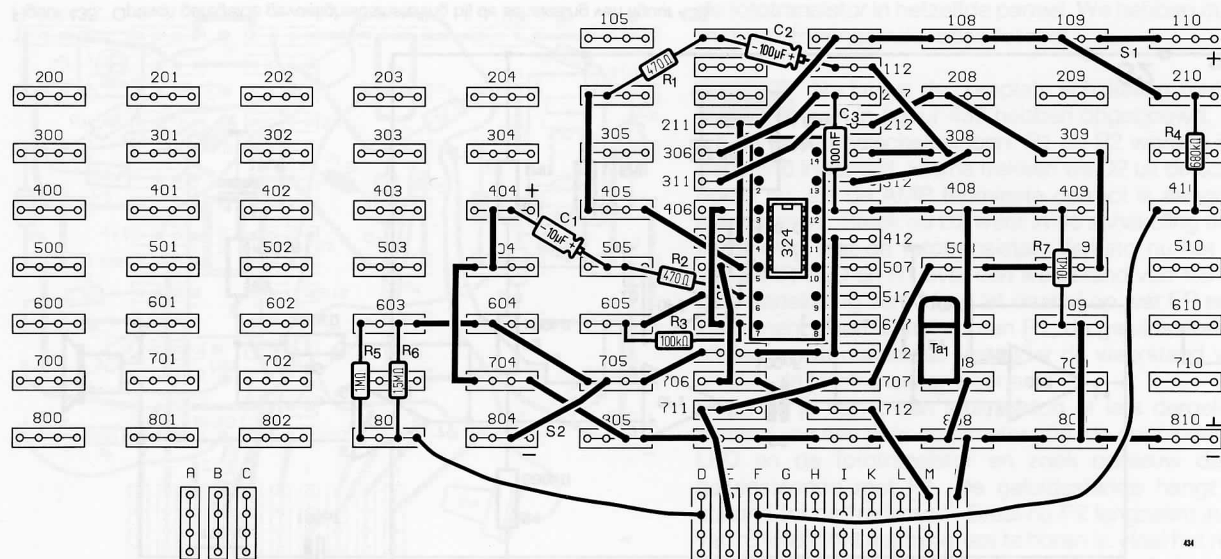
Bij gebruik van licht-emitterende diodes van verschillende kleuren blijkt dat de spanning over de licht-emitterende diodes - bij gelijke stroomsterkte! - *niet* gelijk is. Bij bepaalde types zijn deze verschillen niet erg groot. Soms gaat het zelfs maar om enkele tientallen millivolt. Voor de volgende schakeling is zelfs dit kleine verschil al voldoende. Van deze schakeling kunnen bijv. mensen die vanwege een oogafwijking het verschil tussen rood en groen niet kunnen zien, gebruik maken om de diodes te onderscheiden.

313 De schakeling zoals aangegeven in figuur 431 wekt een toon op. Hoe lager de loper van P1, des te lager is deze toon. Steek nu eens een stuk draad (brug Y) in het verbindingsstuk tussen LED1 en R_V (contact 503) en raak met het andere uiteinde heel even aansluiting E (en dus de loper s van de potmeter) aan. Draai zolang aan de potmeter totdat geen verandering van de toon meer hoorbaar is. Nu de andere LED gebruiken en de proef herhalen. Herhaal de test. Is de toon nu hoger, dan geeft dit aan dat de spanning over deze LED hoger is dan die over zijn collega, en omgekeerd. Op basis van eerdere metingen kunnen we de kleuren bepalen die bij de veranderingen horen.

De schakeling waar we dat mee doen, noemen we een *spanning-frequentie-omzetter*. Het is een handige combinatie van een "één-versterker" (die de bron van de rest van de schakeling ontkoppelt), een invertor (onderste operationele versterker draait de LED-spanning om), een integrator en comparator alsmede een schakeltransistor. De omzetter reageert op verschillen in de ingangsspanning met verschillende toonhoogten. Het is allemaal nog beter te begrijpen, wanneer je de van de ingangsspanning afhankelijke stromen door *R*1, *R*3 en *R*5 enerzijds en door *R*6 anderzijds bekijkt. De stroom die door *R*6 vloeit, is altijd half zo groot als die door de andere weerstanden bij gesperde transistor. Gebruik de verklaringen bij de al behandelde deelschakelingen maar eens bij dit probleem, dan begrijp je alles vast wel!



Figuur 433. Wie roept, zal vinden: het principe van de zelfmeldende sleutelhanger nagebootst. Kan ook worden gebruikt als geluidsgevoelige alarminstallatie.

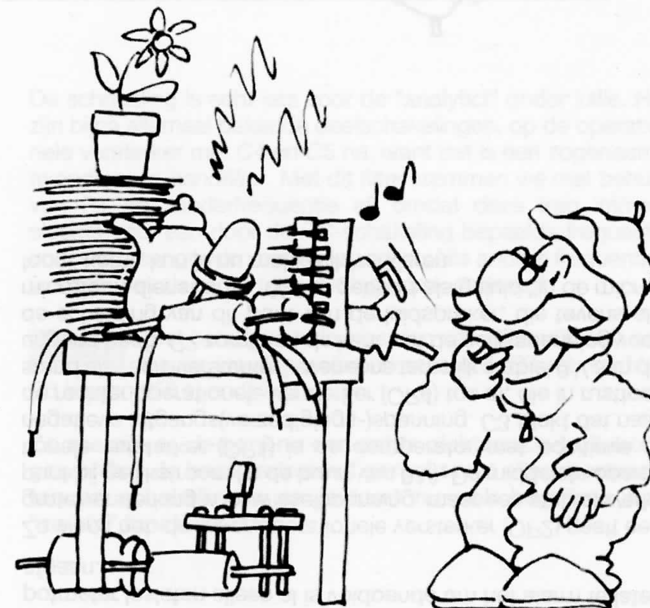


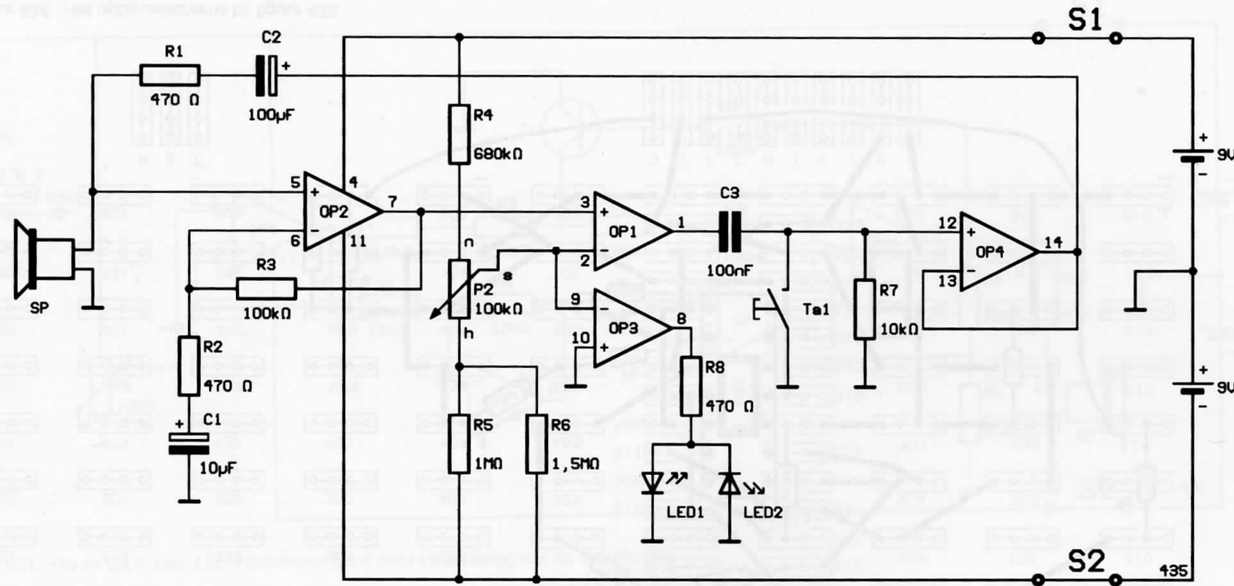
Figuur 434. Het opbouwschema bij figuur 433.

Een zelfgemaakte sleutelhanger die je altijd terugvindt

Van deze dingen moet je er nooit meer dan één in je kamer hebben, want anders houdt het piepen nooit op!

314 Bouw de basis-schakeling voor deze kleine voorbeelden op zoals aangegeven in figuur 433. Of je nu in je handen klapt, fluit of op de tafel slaat, het alarm gaat bij ieder geluid af. En je kunt het pas uitzetten als je op Ta1 drukt. Wel voorzichtig zijn dat er niet weer een ander geluid ontstaat dat het alarm laat afgaan. Van de toleranties van de weerstanden hangt het af, hoe gevoelig P1 kan worden ingesteld. We geven dan ook een mogelijkheid om het geheel verder uit te breiden:

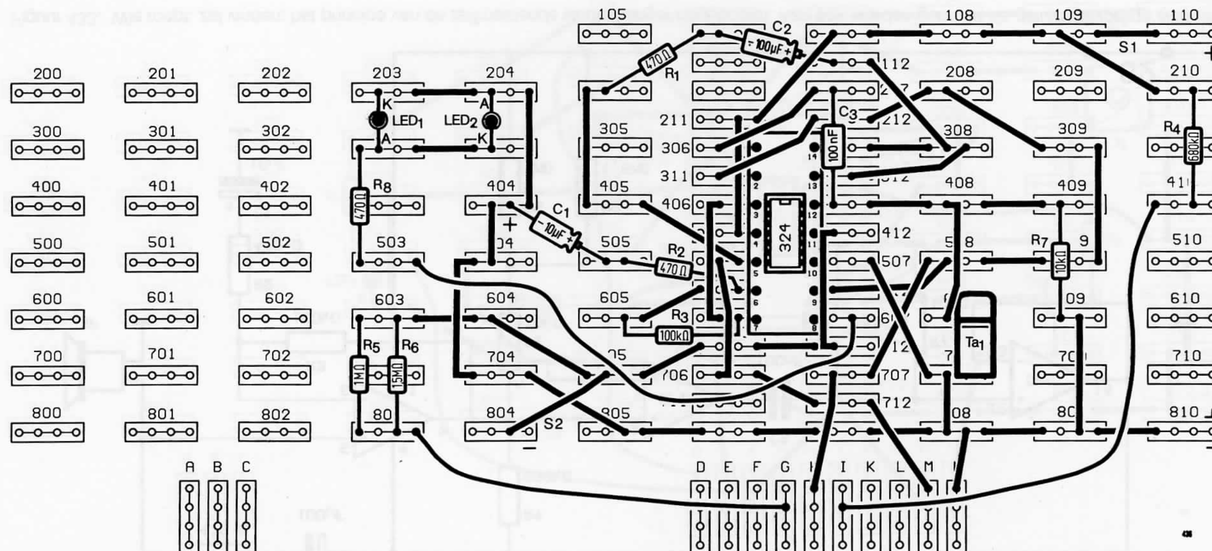




Figuur 435. Optisch geregelde gevoeligheidsinstelling bij de schakeling van figuur 433.

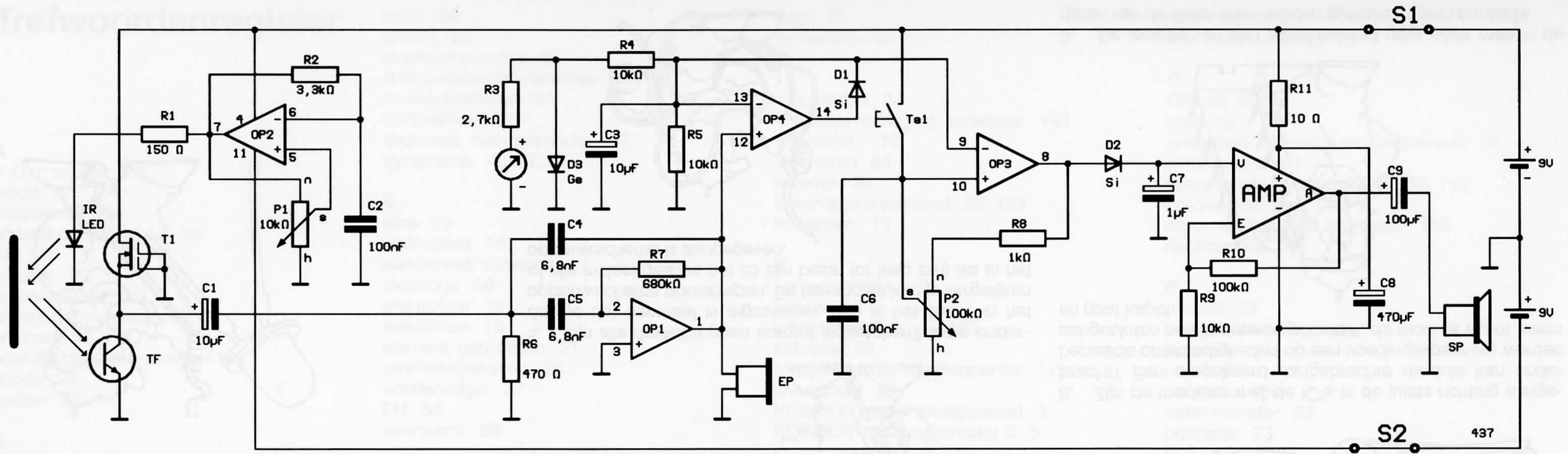
315 Er is nog één operationele versterker vrij. Deze kun je gebruiken voor het uitbreiden van de schakeling zoals aangegeven in figuur 435. Weliswaar wordt nu de instelling een beetje "smaller", maar uiteindelijk wordt onze waakhond nu ook véél "waakser". Houd tijdens het instellen Ta1 ingedrukt en draai aan de potmeter zodat net de ene of de andere LED oplicht. Bewaar nu je kalmte! Want gewoon de potmeter loslaten alleen al is voldoende om het alarm te laten afgaan.

Zo werkt het: de linker operationele versterker (OP2) geeft een grote versterking voor wisselspanning, maar een stabiel werkpunt bij gelijkstroom (in de buurt van 0 V). De middelste operationele versterker (OP1) is de comparator met positieve of negatieve uitgangs(verzadigings-)spanning. *C*3 blokt dat naar de rechter operationele versterker (OP4) toe af, die in rusttoestand als "één-versterker" eveneens tamelijk stabiel 0 V aan de uitgang heeft. *C*2 zorgt aan de kant van de gelijkspanning voor de scheiding van dit punt van de luidspreker, die tevens als microfoon dienst doet. Wat er gebeurt als geluid "in de microfoon" komt, kun je nu makkelijk verklaren.

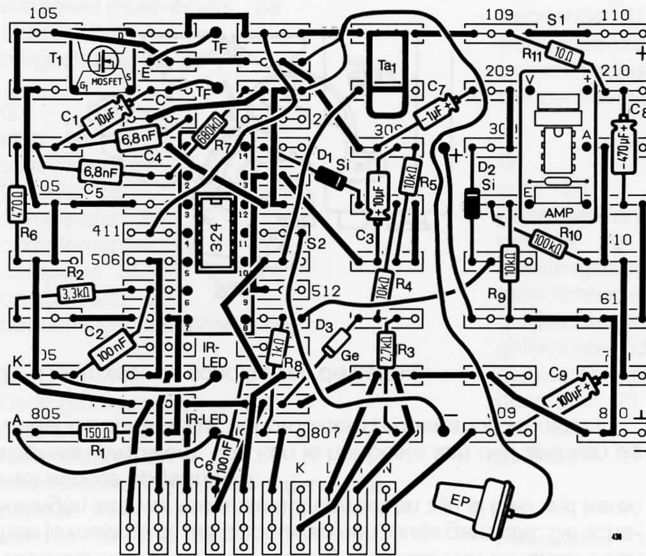


Figuur 436. Het opbouwschema bij figuur 435.





Figuur 437. Storingsvrij dankzij selectie: een op de frequentie van de zender afgestemd operationele versterker-filter in een alarminstallatie met reflex-fotocel.



Figuur 438. Het opbouwschema bij figuur 437.

Alarm - maar dan wel exclusief!
Bij deze installatie wordt de van het paneel af komende infrarood-straal door reflecterende voorwerpen teruggekaatst naar de fototransistor in hetzelfde paneel. We hebben dus te maken met een zogenaamde *reflex-fotocel.*

316 Nadat we de complete schakeling zoals aangegeven in figuur 437 hebben opgebouwd, controleren we eerst de deelschakelingen. P1 en P2 worden in hun middenstand ingesteld. Hierna trekken we D2 uit de schakeling en horen nu, als de AMP tenminste correct is aangesloten, het alarmsignaal. Steek nu D2 weer in de schakeling en maak een verbinding met de fototransistor. Verbind nu het knooppunt van de IR-LED en *R*1 over een weerstand van 1,5 MΩ met de plus-aansluiting van C1 en let daarbij op wat EP en het meetinstrument doen. Draai nu aan P1; de geluidssterkte resp. de uitslag wordt maximaal. Verwijder de weerstand van 1,5 MΩ en sluit de fototransistor weer aan.
Houd nu je hand, een stuk karton of iets dergelijks op een afstand van een paar centimeter vóór de openingen van de IR-LED en de fototransistor en zoek opnieuw de maximale geluidssterkte met P1. De geluidssterkte hangt af van de afstand tot de "reflector". Draai nu P2 langzaam in de richting van n, totdat het alarmsignaal te horen is. Haal het reflectorvlak weg en schakel het alarm af door op Ta1 te drukken. Ga er nog maar eens opnieuw op af, dan is waarschijnlijk ook het alarm weer te horen.

De schakeling is echt iets voor de "analytici" onder jullie. Het zijn bijna allemaal bekende deelschakelingen, op de operationele versterker met *C*4 en *C*5 na, want dat is een zogenaamd *tweede orde-bandfilter.* Met dit filter stemmen we met behulp van P1 de zenderfrequentie af, omdat deze trap immers slechts voor een door de *RC*-schakeling bepaalde frequentie voor een zeer goede versterking zorgt. Alle andere frequenties worden, net als bij de trillingskring, sterk gedempt.

317 Met behulp van de waarden van *R7* en *R6* kan een beetje worden geëxperimenteerd: *R7* tot 1,5 MΩ, *R6* tussen 150 Ω en 2,7 kΩ.

Zo, we zijn er. Je bent nu een echte elektronica-bolleboos geworden. Je bent vertrouwd geraakt met allerlei apparaten en schakelingen en je kunt nu ook begrijpen hoe "zoiets" functioneert.

30. Zo spoor je fouten op.

Wanneer het met een schakeling helemaal niet wil lukken, dan heb je meestal bij het opbouwen een foutje gemaakt. De schakelingen zelf werken absoluut correct en zijn al heel wat keren met succes opgebouwd.
Is er een probleem, dan kun je het beste aan de hand van de volgende controlelijst het probleem proberen op te lossen.

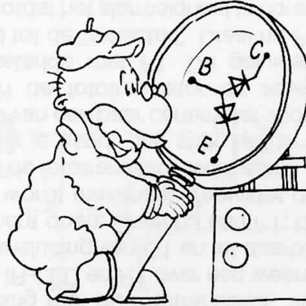
1. Controleer de conditie van de batterij.



2. Ga na of de diodes, de LED's en de elco's in de goede richting zijn aangesloten.



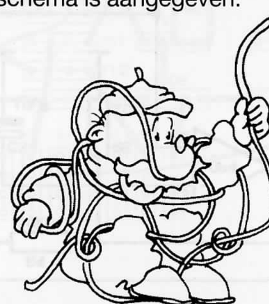
3. Ga na of de transistoren correct zijn aangesloten.



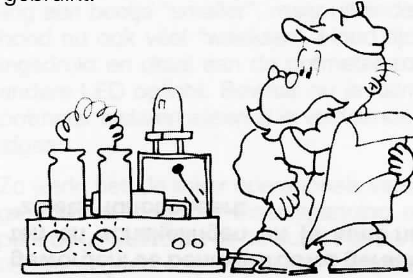
4. De weerstanden 10Ω (bruin-zwart-zwart), 100Ω (bruin-zwart-bruin), 1 kΩ (bruin-zwart-rood), 10 kΩ (bruin-zwart-oranje), 100 kΩ (bruin-zwart-geel) en 1 MΩ (bruin-zwart-groen) alsook 3,3 kΩ (oranje-oranje-rood) en 33 kΩ (oranje-oranje-oranje) en ook 150Ω (bruin-groen-bruin) en 15 kΩ (bruin-groen-oranje), eventueel zelfs 1,2 Ω (bruin-rood-goud) en 12 Ω (bruin-rood-zwart) worden vaak verwisseld!



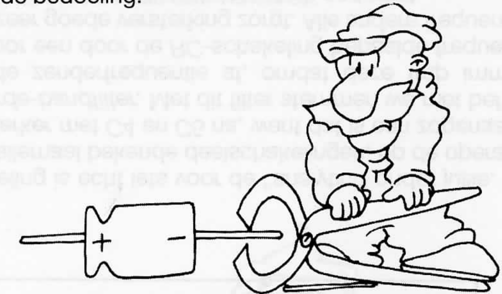
5. Zijn alle draadbruggen correct ingestoken? Ieder onderdeeltje dat eenmaal is ingestoken, kun je het beste in het opbouwschema doorstrepen. En bovendien kun je vergelijken of alle insteekgaatjes net zo zijn bezet (of leeg zijn) als in het opbouwschema is aangegeven.



6. Of een onderdeel kapot is, kun je aan de hand van de schakeling controleren, waarin het onderdeel voor het eerst is gebruikt.



7. Van sommige elementen kunnen de aansluitdraden te lang zijn. Je moet die dan korter maken, omdat ze anders aan de onderzijde (van het paneel) uit de klemveren steken en elkaar kunnen raken. Dat zou dan weer kortsluiting veroorzaken, en dat is niet de bedoeling.

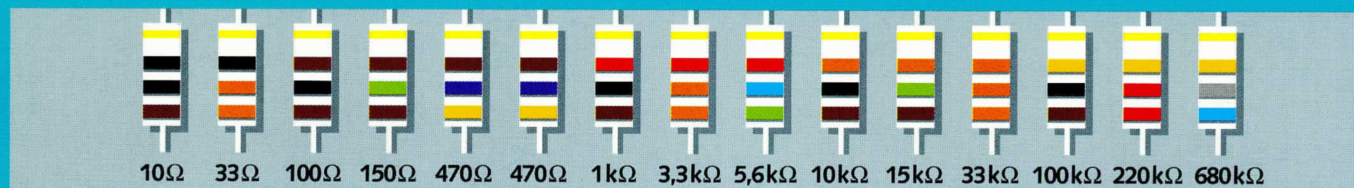


8. Zijn de modules met de IC's in de juiste richting aangebracht? Een omgekeerd aangebrachte module kan onder bepaalde omstandigheden op een voedingsspanning worden aangesloten met verkeerde polariteit: de module wordt warm en gaat kapot.



9. De isolatie van een aansluitdraad mag nóóit mee in de gaten van de klemveren worden gestoken (geen contact)!

Trefwoordenregister



1000 nF = 1µF

100 nF = 0,1µF

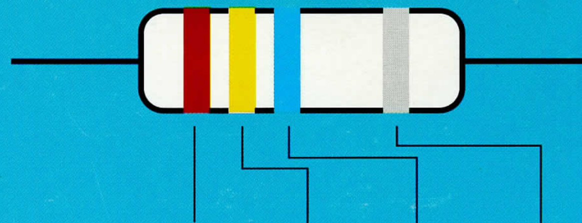
6,8 nF = 6800pF

1000 pF = 1 nF

electronic system I

electronic system II

Als je wilt, kun je de kleurcode van de weerstanden en de omrekentabellen van nanofarad in picofarad resp. microfarad uitknippen en opplakken op de daarvoor bestemde plaatsen op de panelen, zoals aangegeven op de verpakking. Dat ziet er leuk uit en is handig bij het experimenteren.



Kleur	1e ring (1e cijfer)	2e ring (2e cijfer)	3e ring (aantal nullen)	4e ring (tolerantie)
zwart	0	0	–	
bruin	1	1	0	± 1 %
rood	2	2	00	± 2 %
oranje	3	3	000	
geel	4	4	0 000	
groen	5	5	00 000	
blauw	6	6	000 000	
paars	7	7		
grijs	8	8		
wit	9	9		
goud			x 0,1	± 5 %
zilver			x 0,01	± 10 %
zonder ring				± 20 %



614478